



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE DIFERENTES
ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE PAR

María Esténoz Abendaño

Vicente Senosiáin Miquélez

Pamplona, 16 de noviembre de 2012

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Vicente todos los conocimientos adquiridos en la realización del proyecto y a lo largo de la carrera, ha sido un placer disfrutar de tu experiencia. También, a Lourdes por toda su ayuda en el laboratorio, que para mí ha sido crucial en la realización de este proyecto.

En segundo lugar, a mis amigas y amigos por todo el apoyo otorgado durante mi vida, pero, en especial, en los momentos difíciles de estos últimos años. Los ratos de desconexión son muy importantes y sobre todo si los disfruto junto a vosotros.

A mis compañeros de carrera por todo lo sufrido y disfrutado estos tres años. En especial a Leticia, por todas nuestras experiencias, nuestras horas de resolver dudas antes de los exámenes, nuestras largas conversaciones telefónicas, nuestras bronquillas en la realización de las prácticas... No sólo en el aspecto profesional, sino también en el aspecto personal has sido muy importante. Sé que me llevo una amiga de verdad y espero que tú lo pienses también.

Finalmente, a mi familia por darme la oportunidad de cursar la carrera que yo quería y por estar siempre ahí. En especial a mi hermana que, con todos sus conocimientos y paciencia, siempre ha estado encima de mí y apoyándome en todo. Sin tu ayuda me hubiera costado mucho más llegar hasta aquí.

Índice

Objetivo	6
1. Medidor de par por medio de Galgas Extensométricas	10
1.1. Objetivo	10
1.2. Cálculos teóricos	11
1.3. Cálculos prácticos	18
1.3.1. Cálculos mecánicos	18
1.3.2. Cálculos eléctricos	21
1.4. Problemas y posibles soluciones	23
2. Medidor de par por medio de sensores fotoeléctricos	24
2.1. Objetivo	24
2.2. Cálculos teóricos	25
2.3. Cálculos prácticos	28
2.4. Puesta en marcha	31
2.4.1. Medidor del desfase por medio de ARDUINO	33
2.4.2. Medición del desfase por medio de la tensión media	36
2.4.3. Medidor de la deformación por un alargador de pulso ..	37
2.5. Problemas y posibles soluciones	38
3. Medidor de par por medio de sensores piezoeléctrico	39
3.1. Objetivo	39
3.2. Cálculos teóricos	39
Conclusiones	44
Bibliografía	45

Objetivo

El proyecto bajo el título "ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE PAR" tiene por objetivo la comparación de diferentes diseños de medidores de par para concluir finalmente cuál es la manera más cómoda de obtener dicha fuerza.

Las máquinas eléctricas a utilizar en todos los diseños se encuentran en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Pública de Navarra.

En dicho laboratorio, cada banco de trabajo consta de tres máquinas eléctricas rotativas. Dichas máquinas se encuentran unidas por un mismo eje y son una máquina asíncrona de rotor bobinado, una máquina síncrona de rotor bobinado y una máquina de corriente continua con el estátor bobinado. Esta última tiene la peculiaridad de que es una dínamo-freno, que sirve para medir la potencia mecánica de una máquina.



Fig. 1: Máquinas eléctricas utilizadas en el proyecto.

La dínamo-freno consiste en que el estátor de la máquina de corriente continua gira libremente entre dos topes con respecto al eje en el que también lo hace el rotor. El principio fundamental de la dínamo-freno, cumpliendo la tercera ley de Newton, es que al excitar la máquina se origina en el estátor un par de la misma magnitud y de signo contrario al par motor a medir. La forma de medir dicho par se hace por medio de una báscula. Además, la energía liberada en el proceso es absorbida por unas resistencias conectadas al rotor de la máquina de corriente continua.

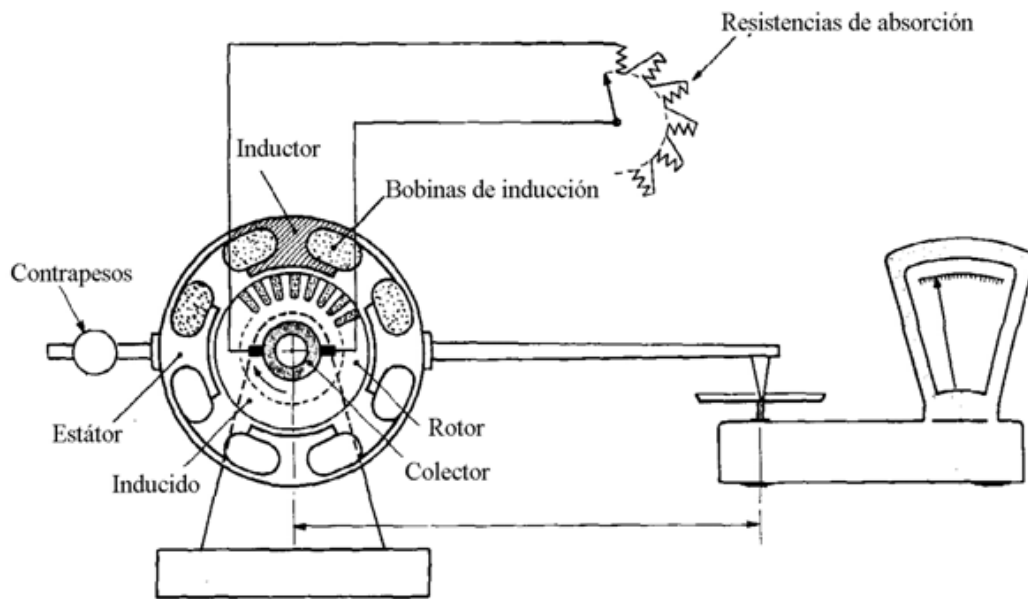


Fig. 2: Principio de la dínamo-freno.

El par electromagnético es la fuerza que se opone a la fuerza originada en una máquina eléctrica por la circulación de una corriente por sus conductores del rotor.

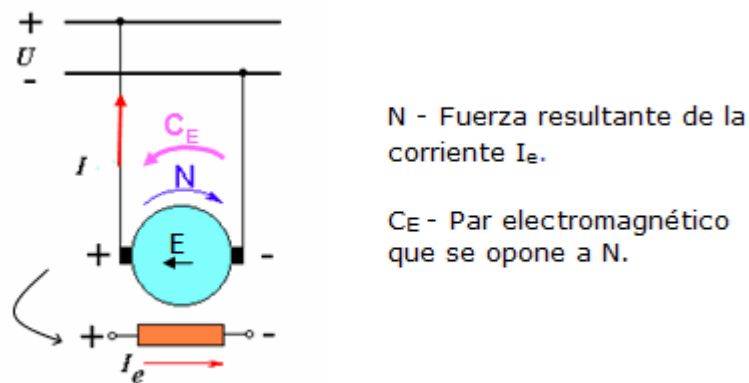


Fig. 3: Par electromagnético.

La medición del par electromagnético sirve para determinar las características eléctricas de una máquina eléctrica.

Actualmente, en el laboratorio de la UPNA, el proceso para medir el par está basado en la utilización de una barra milimetrada y un par de pesas. La barra mide la distancia desde el eje de la máquina hasta una distancia máxima al exterior de 54.4 cm. La masa de las pesas puede ser

de 1.125kg ó 3.975kg. Para proceder a la medición del par, se empieza enroscando la barra milimetrada a la carcasa estatórica y se introduce la pesa en la barra. Se va probando la distancia a la que debe estar la pesa para que se mantenga en estado de equilibrio y totalmente horizontal respecto al suelo. Alcanzado dicho punto, se multiplica la distancia, desde el eje hasta donde se encuentra la pesa, por el peso de la pesa.



Fig. 4: Medidor de par actual.

El inconveniente principal de este método es que la manera de obtener el par es un tanto incómoda, ya que se debe conseguir el estado de equilibrio entre la máquina y el conjunto formado por la barra milimetrada y la pesa. Además, la medición tampoco es inmediata, sino que se deben realizar operaciones matemáticas posteriormente.

Otra desventaja que posee es que este sistema de medición sólo se puede aplicar en régimen permanente, debido a que está basado en alcanzar un estado de equilibrio.

Por ello, el objetivo primordial de este proyecto radica en idear la forma de obtener dicho par de un modo más cómodo e inmediato.

1. Medidor de par por medio de Galgas Extensométricas

1.1. Objetivo

Este medidor se diseñó en un proyecto anterior a éste bajo el título "*SENSOR DE PAR PARA DINAMO-FRENO*".

Este método consiste en anclar la carcasa estatórica al soporte de la máquina por medio de una pletina metálica. En la pletina se adhiere una galga extensométrica del tipo resistencia variable según las deformaciones mecánicas que sufre. Esta galga, a su vez, está conectada a otras resistencias fijas formando un puente Wheatstone. Mediante este sistema se relaciona la deformación que sufre la pletina metálica, por la fuerza que ejerce la carcasa en ella, con el par generado en dicha carcasa. Esta relación se obtiene por medio de una tensión eléctrica.



Fig. 5: Montaje del proyecto.

1.2. Cálculos teóricos

Una galga extensométrica es un sensor para medir la deformación, torque, presión, carga, posición, entre otras cosas, basado en el efecto piezorresistivo.

El efecto piezorresistivo es la propiedad de algunos materiales conductores o semiconductores, cuya resistencia varía cuando se les somete a un esfuerzo o estrés mecánico que los deforma. Estos cambios se deben a la variación de la amplitud de las oscilaciones de los nudos de la red cristalina del metal. Dicha deformación ocurre en la dirección de los ejes mecánicos.

La causa del cambio de resistencia puede ser el cambio en la longitud, el cambio originado en la sección o el cambio generado en la resistividad.

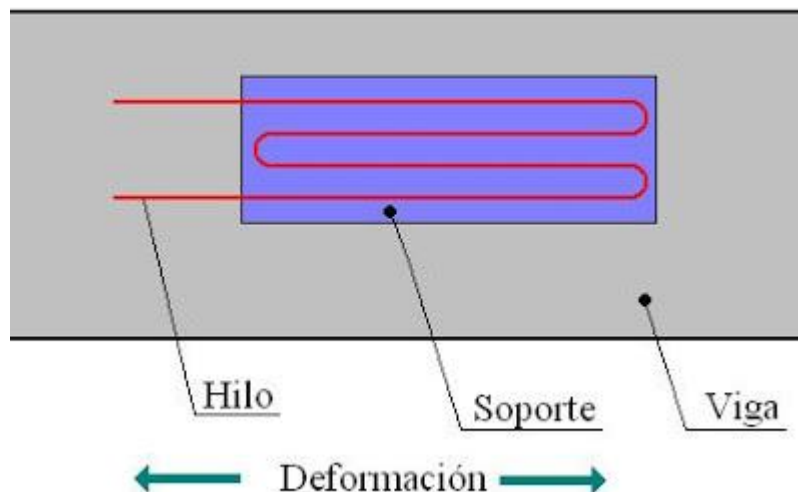


Fig.6: Esquema de una galga extensométrica.

Para medir la resistencia de una galga extensométrica, se considera ésta como un hilo metálico de longitud l , sección A y resistividad ρ :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Cuando se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes, que influyen en el cálculo de la resistencia, experimenta un cambio, y por ello también varía la resistencia de la forma:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

Por la Ley de elasticidad de Hooke o también llamada ley de Hooke, que establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada, obtenemos:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{A \cdot E}$$

Siendo:

- $\epsilon \rightarrow$ alargamiento unitario.
- $\delta \rightarrow$ alargamiento.
- $L \rightarrow$ longitud original.
- $F \rightarrow$ fuerza aplicada.
- $A \rightarrow$ sección transversal de la pieza.
- $E \rightarrow$ módulo de Young, es adimensional, pero se suele dar en "microdeformaciones".

Esto se aplica en materiales elásticos hasta un límite de tensión, que recibe el nombre de límite elástico.

La relación existente entre la deformación unitaria (ϵ) y la tensión mecánica (σ) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \epsilon \cdot E = \frac{dl}{l} \cdot E$$

Ahora se considera que la pieza, además de tener una longitud l , también tiene una dimensión transversal t . Al aplicarle un esfuerzo longitudinal experimenta una variación tanto de su longitud l como de su dimensión transversal t .

La relación entre ambas variaciones viene dada por el coeficiente de Poisson. Este coeficiente es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de un material elástico lineal e isótropo cuando se le aplica una fuerza longitudinal que hace que se estire en la dirección perpendicular a esta fuerza.

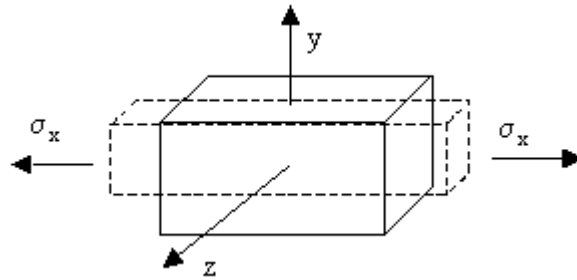


Fig. 7: Efecto de un alargamiento longitudinal.

El coeficiente de Poisson se calcula con la siguiente ecuación:

$$\mu = -\frac{dt/t}{dl/l}$$

El valor de este coeficiente para los materiales que se usan generalmente en ingeniería está comprendido entre 0 y 0.5, siendo el 0.5 cuando el material es isótropo elástico perfectamente incompresible.

En cuanto a la variación de la sección A y siguiendo considerando como un hilo conductor, se supone una sección cilíndrica de diámetro D:

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{2 \cdot dD}{D} \rightarrow \frac{dD}{D} = \frac{dt}{t}$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{2 \cdot \mu \cdot dl}{l}$$

La variación de la resistividad ρ está relacionada con el efecto piezorresistivo explicado anteriormente. Como ya se ha dicho, este efecto está relacionado con la variación de la amplitud de las oscilaciones en los nudos de la red cristalina del metal. Si ésta se tensa, la amplitud de las oscilaciones aumenta, y esto hace que la velocidad de los electrones disminuya y, por tanto, la resistividad lo haga también.

En el caso de los metales, los cambios porcentuales de resistividad y de volumen son proporcionales siguiendo esta ecuación:

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \cdot \frac{dV}{V}$$

Siendo:

- $V \rightarrow$ volumen de la pieza.
- $C \rightarrow$ constante de Bridgman, cuyo valor es de 1.13 a 1.15 para las aleaciones empleadas comúnmente para las galgas y 4.4 para el platino.

Sabiendo que el volumen de una sección cilíndrica es:

$$V = \frac{\pi \cdot l \cdot D^2}{4}$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{2 \cdot dD}{D} = \frac{dl}{l} \cdot (1 - 2\mu)$$

Por tanto, suponiendo que el material es isótropo y no supera el límite de elasticidad:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \\ \frac{dR}{R} &= C \cdot (1 - 2\mu) \frac{dl}{l} + \frac{dl}{l} - \left(-2\mu \cdot \frac{dl}{l}\right) \\ \frac{dR}{R} &= \frac{dl}{l} [(C \cdot (1 - 2\mu) + 1 + 2\mu)] = K \cdot \frac{dl}{l} \end{aligned}$$

Siendo K el denominado factor de sensibilidad de la galga. Este factor es del orden de 2 para los metales utilizados generalmente en ingeniería, salvo para el platino que es del orden de 6 y para los materiales iso-elásticos que es del orden de 3.5.

Con esto se llega a la conclusión de que para pequeñas variaciones de resistencia en el hilo metálico deformado, dichas deformaciones se pueden calcular:

$$R = R_o \cdot (1 + x)$$

Siendo:

- $R \rightarrow$ resistencia final.
- $R_o \rightarrow$ resistencia inicial.
- $x = K \cdot \epsilon$

En este caso, el cambio de resistencia no excede el 2%.

Como se puede observar en la ecuación, la variación de resistencia de un material está relacionada con la deformación que sufre este material cuando es sometido a un esfuerzo. Al medir la variación de resistencia, se obtiene la relación que existe entre la deformación que

sufre este material y el esfuerzo que la crea. Y gracias a ello, se consigue conocer los esfuerzos aplicados y las magnitudes que provocan dichos esfuerzos. Esto es lo que logra hacer una galga extensométrica.

Aunque las galgas se llevan utilizando desde hace mucho tiempo y se usan en múltiples aplicaciones, éstas poseen un gran número de limitaciones que se deben tener en cuenta a la hora de utilizarlas. Algunas de estas limitaciones son:

- El esfuerzo aplicado a la galga no debe llevar a ésta fuera del margen elástico de deformaciones. Este margen no excede del 4% de la longitud inicial de la galga y se comprende entre $3000\mu\epsilon$ para galgas semiconductoras hasta $40000\mu\epsilon$ para galgas metálicas.
- Se debe conseguir que la deformación de la galga sea igual a la del material. Para ello, la galga se debe adherir al material utilizado mediante un pegamento elástico que sea suficientemente estable con el tiempo y la temperatura. Además, la galga debe estar aislada eléctricamente del objeto a medir y protegida del ambiente.
- La temperatura es muy importante, ya que puede causar variación de la resistencia sin aplicar ningún esfuerzo. Esto nos da un error en la medición.
- La potencia disipada, cuando se hace circular una corriente por la galga, también hace que la temperatura varíe con el mismo efecto que en el punto anterior. Para evitarlo, se limita la corriente que pasa por las galgas dependiendo del material en el que esté adherida. Por ejemplo, para una galga metálica, que es la que se utiliza en este método, la corriente máxima es de 25mA si el material es buen conductor y de 5mA si es mal conductor. La potencia también se limita en función del área de la galga.
- Para evitar tensiones mecánicas, el coeficiente de dilatación de la galga debe ser parecido al del material.
- El esfuerzo aplicado al material también lo debe estar en su totalidad aplicado en la galga, ya que ésta sólo proporciona los datos de la zona donde está situada.

Para obtener una señal eléctrica proporcional a la variación de resistencia, lo que se hace es construir un puente Wheatstone con tres resistencias fijas y una galga.

Un puente Wheatstone sirve para medir el valor de una resistencia desconocida por medio de otras tres que sí son conocidas. El esquema adecuado es el siguiente:

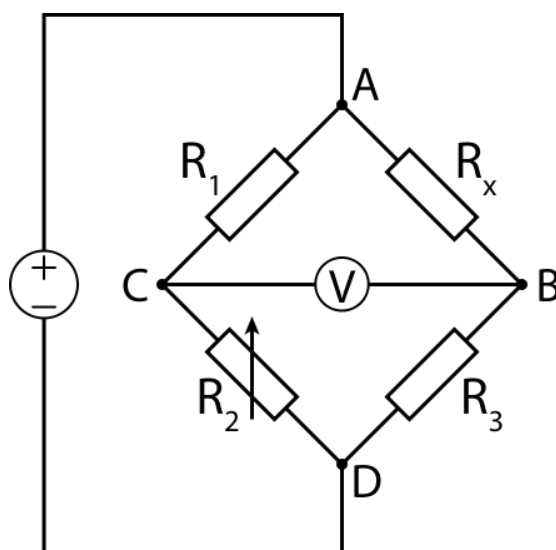


Fig. 8: Puente Wheatstone.

En el caso de este proyecto, se va a considerar que las resistencias conocidas y de valor fijo son R_1 , R_2 y R_x y que R_2 , que es una resistencia variable, es la galga que mide la deformación del material en el que está situada.

Al aplicar una tensión continua entre los nodos A y D, la tensión entre los nodos C y B dependerán del valor de la resistencia de la galga. Si la tensión entre C y B es nula, quiere decir que el puente está en equilibrio, es decir, que el valor de todas las resistencias es el mismo. Esto es así cuando la galga está en reposo y no se ejerce ningún esfuerzo en ella. Si la tensión entre C y B no es nula, quiere decir que el puente está desequilibrado y que la corriente que circula por la rama creada por las resistencias R_x y R_3 no es la misma que la que circula por la rama formada por R_1 y R_2 . Como las resistencias R_1 , R_2 y R_x tienen un valor fijo, la única resistencia que puede crear este desequilibrio es la galga.

La variación de tensión entre el nodo C y el B está relacionado con la variación de la resistencia de la galga. Cuanto mayor sea la desviación de la resistencia de la galga con respecto a su valor de reposo, mayor será esta variación de tensión. Con esto se consigue la relación entre una tensión eléctrica de salida (la tensión entre los nodos C y B) y la fuerza ejercida sobre la galga (en este caso será el par de la máquina).

Este método recibe el nombre de método de deflexión, que es la forma habitual de obtener una señal eléctrica por medio de un puente Wheatstone.

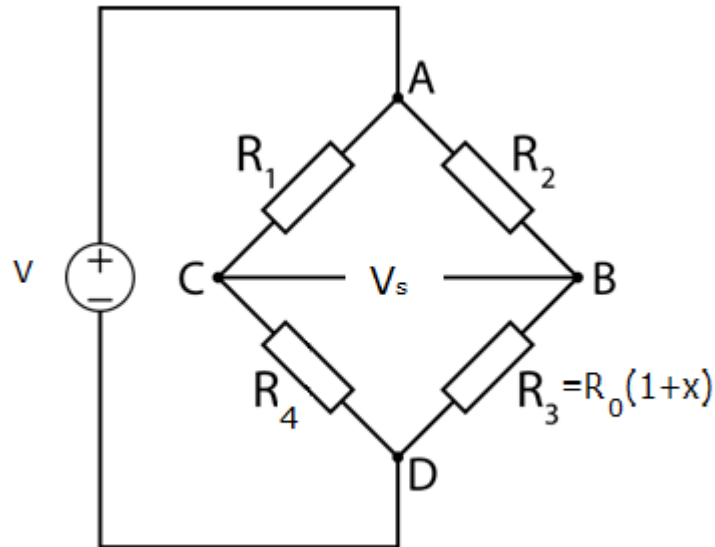


Fig. 9: Puente Wheatstone con galga extensométrica.

Se considera que el puente está en equilibrio, en este caso $x=0$. Se obtiene la siguiente relación:

$$k = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_0}$$

Se obtiene V_s :

$$V_s = V \cdot \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right) = V \cdot \left(\frac{kx}{(k+1) \cdot (k+1+x)} \right)$$

Se llega a la conclusión de que la tensión de salida V_s sólo es proporcional cuando se cumple que $x \ll k+1$. Como esta salida se va a interpretar en función de la galga (R_3), la sensibilidad real será:

$$S = \frac{V_s}{x \cdot R_0} = \frac{V \cdot k}{R_0 \cdot (k+1) \cdot (k+1+x)}$$

Para calcular el máximo de esta sensibilidad se realiza la derivada de la ecuación anterior con respecto a k y se iguala a cero:

$$k^2 = 1 + x$$

1.3. Cálculos prácticos

1.3.1. Cálculos mecánicos

La célula de carga que se va a utilizar va a estar formada por una pletina de aluminio de dimensiones 250x40x6 mm, una galga extensométrica situada en el centro geométrico de la pletina y dos taladros separados 200 mm para colocar dos tornillos de sujeción de métrica 10 y de clase 6.8 con sus respectivas tuercas y arandelas.

Dichos tornillos deben ir uno enroscado al orificio donde se enrosca la barra milimetrada y el otro al soporte de las máquinas, de tal forma que la pletina se apoye de manera plana al soporte y perpendicular al eje de las máquinas. Con ello, lo que se consigue es que la pletina sólo esté sometida a esfuerzos de tracción o compresión, no de flexión.

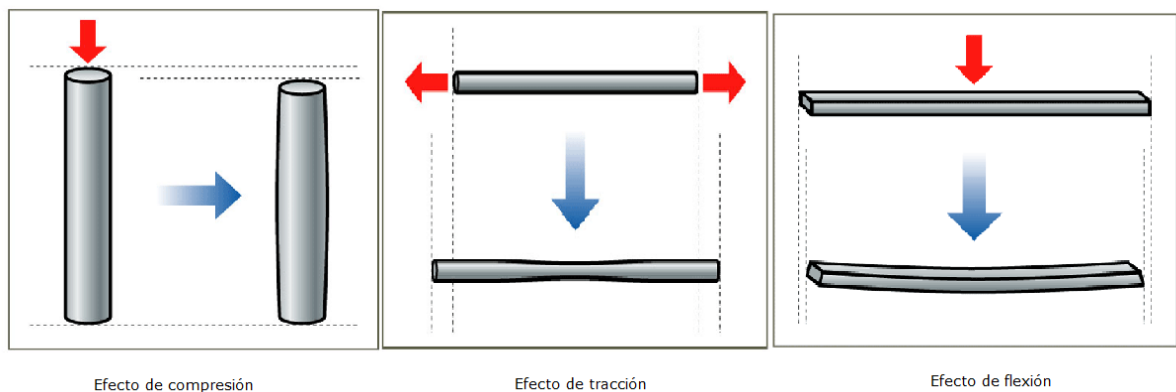


Fig. 10: Efectos de compresión, de tracción y de flexión.

Para saber si los elementos anteriormente descritos van a soportar los esfuerzos de la máquina hay que realizar varios estudios.

Primeramente, hay que saber si el grosor de la pletina es suficiente para que ésta no se rompa ni se deforme. Además, hay que saber si se va a producir pandeo que haga que la pletina no sólo esté sometida a efectos de compresión o tracción.

Para saber si la pletina va a soportar estos esfuerzos se debe calcular la resistencia de la misma. Para ello, se sabe que la máquina, según su placa de características, tiene una potencia nominal de 3kW y una velocidad nominal de 1500rpm. Con esto se calcula el par nominal de la máquina:

$$P_n = T_n \cdot \omega_n$$

$$T_n = \frac{3kW}{157.1 \text{ rad/s}}$$

$$T_n = 19.1Nm$$

Se dimensionan los cálculos para un par nominal de 20Nm.

Como el par es la fuerza por la distancia, y se sabe que la pletina está a una distancia de 0.135m del eje de la máquina:

$$T = F \cdot d$$

$$F = \frac{20Nm}{0.135m} = 148.148N$$

Esta fuerza es la sometida a la pletina en régimen permanente, pero en el régimen transitorio se hace una mayor fuerza sobre ella. Por ello, se va a considerar que en el transitorio dicha fuerza es diez veces mayor a la del permanente (1500N).

Sabiendo que el límite elástico del aluminio es de 40Kgf/mm² y que la gravedad (9.81m/s²) equivale a 392.24N/mm², se supone un coeficiente de seguridad de 3, con lo que se obtiene que no se debe exceder de una tensión de:

$$\frac{392.24 \text{ N/mm}^2}{3} = 130.75MPa$$

Por la Ley de Hooke, explicada anteriormente, se obtiene que la sección mínima que debe tener la pletina es de:

$$\frac{1500N}{130.75 \text{ N/mm}^2} = 11.47mm^2$$

Como la sección de la pletina es de 240mm², se puede asegurar que no se va a romper ni deformar.

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que se puede dar en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión.

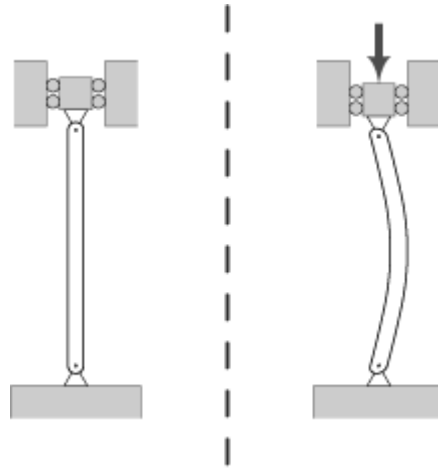


Fig. 11: Efecto pandeo.

Para saber si se va a producir pandeo en la pletina, se debe calcular la carga crítica de pandeo por la ecuación de Eulen:

$$P_{crit} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_{min}}{L^2}$$

Siendo:

- $E \rightarrow$ modulo de Young, en este caso 69000MPa.
- $I_{min} \rightarrow$ momento de inercia mínimo de la sección transversal. Para calcularlo, se sabe que los apoyos son articulados, con lo que hay que multiplicar a la longitud por un coeficiente que vale 1.

$$I_{min} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0.04 \cdot 0.006^3}{12} = 7.2 \cdot 10^{-10} m^4$$

- $L \rightarrow$ la longitud entre los apoyos (0.2m).

$$P_{crit} = \pi^2 \cdot \frac{69000MPa \cdot 7.2 \cdot 10^{-10} m^4}{(0.2m)^2} = 12258N$$

Como se ha determinado un coeficiente de seguridad de 3, se debe dividir por dicho coeficiente:

$$\frac{12258N}{3} = 4086N > 1500N$$

Dado que el esfuerzo máximo que se ha estimado anteriormente que va a soportar la pletina es menor que el calculado ahora, se puede asegurar que la pletina no estará sometida a pandeo.

Además de estos cálculos mecánicos de la pletina, también hay que saber si los tornillos empleados se van a deformar con los esfuerzos de la máquina.

Se van a utilizar dos tornillos de clase 6.8, lo que quiere decir que la primera cifra de la clase multiplicada por 100 nos da el límite de rotura del tornillo en megapascuales, y la segunda cifra multiplicada por 10 es el valor de la tensión en el límite elástico expresada como porcentaje del valor del límite de rotura. Así pues, el límite de rotura es de 600MPa y su límite elástico es el 80% de 600MPa, es decir, 480MPa. Esta tensión es muy superior a la que va a tener que soportar (19.098MPa). Como consecuencia, los tornillos ni se van a deformar ni se van a romper.

1.3.2. Cálculos eléctricos

Para la obtención y acondicionamiento de la señal que se obtiene de la variación de la resistencia de la galga, se implementa un circuito donde se pueden diferenciar dos partes. Una primera parte formada por el puente Wheatstone y una segunda parte constituida por un circuito amplificador, ya que se espera obtener señales del orden de los microvoltios. Este circuito estará alimentado por dos pilas de 9V tipo 6LR61 recargables con un conmutador de dos polos para cortar la alimentación y, a su vez, estará introducido en una caja metálica puesta a tierra.



Fig. 12: Elementos empleados.

La parte del circuito formada por el puente Wheatstone es la que permite la captación de la señal. Esta parte estará alimentada por una referencia de tensión de precisión de un valor de 2.5V. Para obtener dicha tensión, se emplea un circuito integrador LT1009 y su correspondiente circuitería complementaria. Este sistema aporta una tensión muy precisa, pero no permite la extracción de potencia de ella, con lo que se va a usar un seguidor de tensión que sí permite esa extracción de potencia pero, al tener una gran impedancia de entrada, no extrae apenas corriente de la referencia de tensión. El seguidor de tensión se consigue con un LM324.

Como ya se ha mencionado anteriormente, las galgas pueden presentar pequeñas desviaciones cuando están en reposo debido a pequeños esfuerzos o por la deriva térmica. Para impedir este fenómeno, el puente debe ponerse a tierra, mediante el uso de un potenciómetro.

El potenciómetro a utilizar es de 10k Ω , sus dos terminales fijos se conectarán uno a 2.5V y otro a 0V, mientras que el variable se conectará a una resistencia de 10k Ω . El otro extremo de ésta irá unido con la salida del puente donde no esté conectada la galga. De esta manera, se consigue que la tensión de la rama donde se ha conectado el potenciómetro sea igual a la tensión que hay en la rama de la galga.

Para calcular el orden de la salida del puente Wheatstone, se han tenido en cuenta varios factores ya citados en el proyecto bajo el título "*SENSOR DE PAR PARA DINAMO-FRENO*", en el apartado "*Cálculo de la salida del puente Wheatstone*", en el que se llega a la conclusión de que la tensión de salida del puente es del orden de los 10 μ V.

En cuanto al circuito de amplificación, se le introduce la señal de salida del puente Wheatstone, donde se amplificará y filtrará.

Este circuito está formado por un filtro pasivo doble de primer orden conectado a la salida del puente, un amplificador de instrumentación de ganancia 1000, dos etapas de amplificación de ganancias 100 y 10 con amplificadores operacionales en configuración de amplificador inversor, una última etapa de amplificación de ganancia 10 pero de carácter variable ya que se ha conectado a un potenciómetro en la rama de realimentación que permite ajustar la amplitud de la señal de salida y, por último, esta señal de salida de los amplificadores se somete a un filtro pasivo de primer orden con una frecuencia de corte de 4.8 Hz.

El primer filtro colocado permite realizar la amplificación eliminando los ruidos a altas frecuencias. El segundo filtro, por el contrario, sirve para eliminar los ruidos de bajas frecuencias en la salida y, así, se elimina el ruido para medir en continua.

Para minimizar las interferencias entre la red y el circuito, se han utilizado cables apantallados, cuyo apantallamiento estará conectado a tierra, como también lo estará la caja metálica donde se ha introducido el circuito completo.

1.4. Problemas y posibles soluciones

El mayor problema encontrado en este método es que la señal de salida es inestable. Esa inestabilidad no se ha podido eliminar ni con el filtrado ni con el apantallado.

Además, como se está trabajando con tensiones del orden de los microvoltios, una pequeña variación de resistencia origina también una variación de tensión pequeña pero significativa en este caso. También hay que tener en cuenta que al utilizar los amplificadores operacionales, éstos no son ideales y presentan una tensión denominada V_{outset} que normalmente es despreciable dado su pequeño valor, pero que en este caso, como es del mismo orden que la tensión de salida, sí que afecta en la medición.

En el caso de la frecuencia de la señal de salida, dicha frecuencia tiene un valor pequeño y existen unas series de ruidos a frecuencias muy parecidas a ésta que hacen que no puedan ser eliminados sin repercutir en la señal de salida.

Una posible medida que se puede adoptar para conseguir eliminar esta inestabilidad de la señal de salida es la de alimentar el puente Wheatstone con corriente alterna. Este método permite elegir la frecuencia a la que se quiere la tensión de salida. Con esto, lo que se consigue es que dicha frecuencia sea diferente a la frecuencia anteriormente explicada y así se puedan eliminar los ruidos que interferían en la salida.

Otra alternativa es utilizar galgas más precisas, pero esta medida no interesa dado el elevado precio de las mismas.

2. Medidor de par por medio de sensores fotoeléctricos

2.1. Objetivo

Este sistema consiste en obtener el par de la máquina de una manera dinámica, por medio de una relación entre el par y la deformación que sufre los acoplamientos que unen los ejes de las tres máquinas con las que se trabaja. Esta deformación es debida al efecto de torsión que sufren los acoplamientos, ya que una máquina arrastra a otra.

El efecto de torsión es la sollicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo o prisma mecánico, como pueden ser ejes o, en general, elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos, aunque es posible encontrarla en situaciones diversas.

La torsión se caracteriza geométricamente porque cualquier curva paralela al eje de la pieza deja de estar contenida en el plano formado inicialmente por las dos curvas. En lugar de eso, una curva paralela al eje se retuerce alrededor de él.

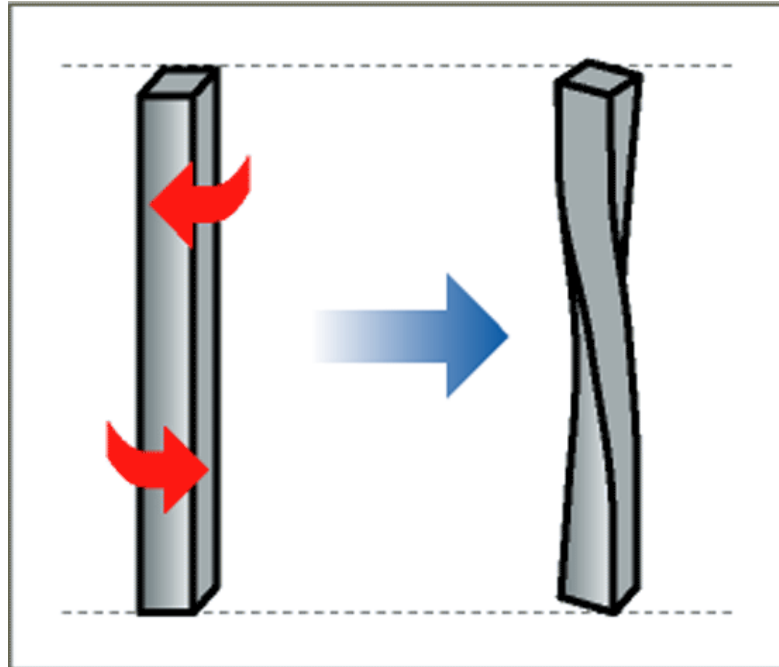


Fig. 13: Efecto de torsión.

Para medir la deformación por torsión, se van a utilizar dos sensores ópticos con sus encoders correspondientes cada uno. Los sensores estarán colocados en los extremos del acoplamiento. La señal de los sensores será

enviada a un osciloscopio donde se verán las dos señales y así analizarlas y obtener la relación entre el par y la deformación.

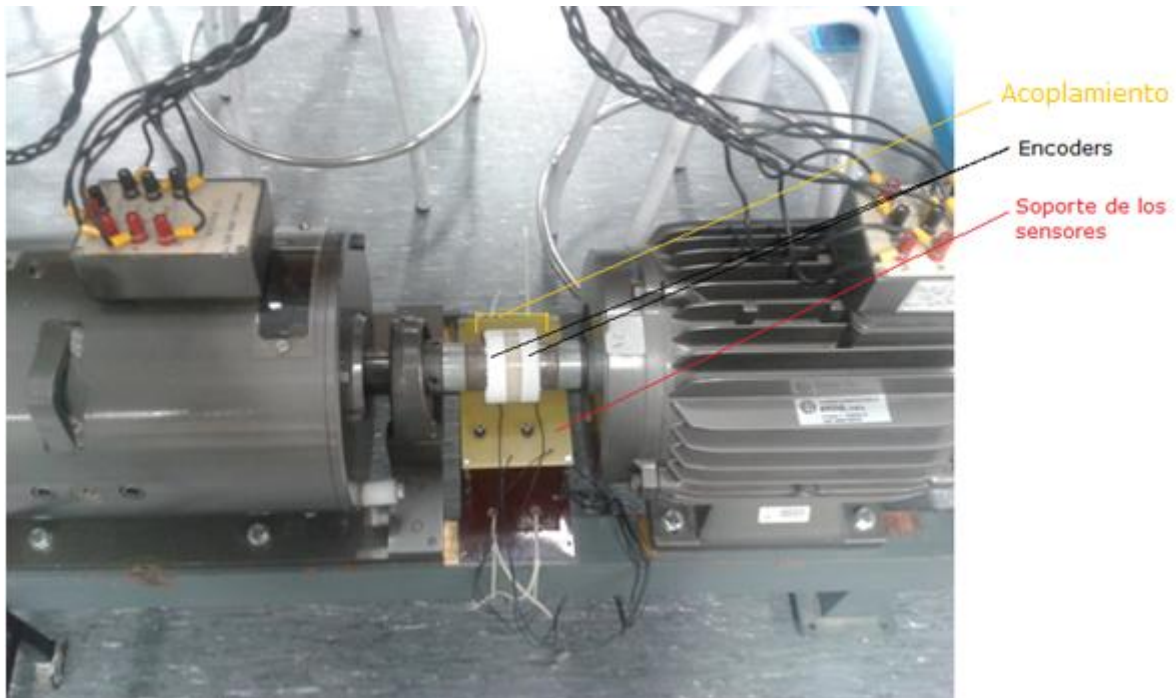


Fig. 14: Montaje realizado.

2.2. Cálculos teóricos

Primeramente, se deben realizar los cálculos apropiados para saber si los sensores son capaces de medir la deformación del acoplamiento, u observar si la deformación es suficientemente grande como para que los sensores la capten. Para ello, lo primero es saber las características de los acoplamientos utilizados en el laboratorio.

Según la hoja de características, se trata del acoplamiento M-28, formado de poliamida.

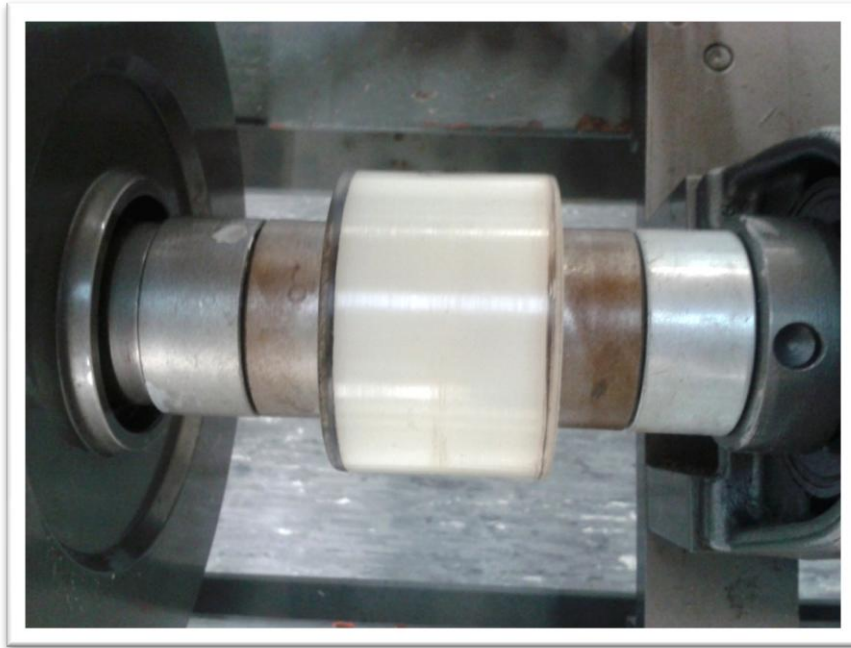


Fig. 15: Acoplamiento mecánico.

La poliamida pertenece a la familia de los polímeros, contiene enlaces de tipo amida y sus características mecánicas son las siguientes:

- Resistencia mecánica, dureza, rigidez y tenacidad medias-elevadas.
- Buena resistencia a la fatiga.
- Alto poder amortiguador.
- Buenas propiedades de deslizamiento.
- Resistencia sobresaliente al desgaste.

Para realizar los cálculos de la deformación se considera la forma del acoplamiento como la de un cilindro con sección hueca centrada en el eje. Para esta forma, la ecuación que se debe utilizar para calcular el ángulo de deformación es la siguiente:

$$\theta = \frac{T \cdot L}{J \cdot G}$$

Siendo:

- $T \rightarrow$ Par de torsión [N·m].
- $L \rightarrow$ Longitud de la pieza [m].
- $J \rightarrow$ Momento polar de inercia [m^4].
- $G \rightarrow$ Modulo de elasticidad al cortante [GPa].

- $\theta \rightarrow$ Ángulo de torsión [rad].

En este caso, los valores de dichas variables son los siguientes:

a) Para calcular el par de torsión se debe utilizar esta ecuación:

$$T = F \cdot \frac{D}{2}$$

Siendo:

- $F \rightarrow$ Fuerza que se ejerce en la pieza [N].
- $D \rightarrow$ Diámetro de la pieza [m].

b) La longitud de la pieza (L) es de 46mm, según las hojas de características del fabricante.

El momento polar de inercia se calcula con:

$$J = \frac{\pi}{2} \cdot (r_{ext}^4 - r_{int}^4)$$

Siendo:

- $r_{ext} \rightarrow$ Radio exterior de la pieza [m], en este caso 65mm.
- $r_{int} \rightarrow$ Radio interior de la pieza [m], en este caso 44mm.

c) El modulo de elasticidad (G) es de 1,2 GPa, ya que la pieza es de poliamida.

Mediante estos cálculos, se obtiene que la deformación que sufren los acoplamientos de las máquinas es del orden de los microradianes. Los sensores que se van a utilizar son capaces de detectar el orden de estas deformaciones.

2.3. Cálculos prácticos

Para realizar los cálculos prácticos se van a utilizar dos sensores objeto reflectante OPB608A.

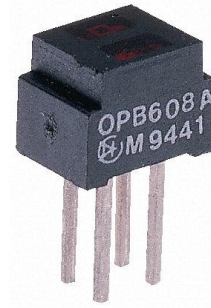


Fig. 16: Sensor OPB608A

Éstos son sensores reflexivos del objeto, constan de un diodo LED y un transistor. El diodo LED, que es un diodo semiconductor con emisión de luz, emite la luz que después el transistor recibe.

Cada sensor irá colocado en los extremos de la pieza plástica y en cada extremo se colocará el encoder correspondiente para cada sensor.

Para saber cuál es el encoder más apropiado para cada sensor, lo adecuado es crear varios encoders de diferentes medidas e ir probando desde una distancia mínima hasta encontrar la medida que el sensor detecta. Los encoders utilizados, en un principio en este proyecto, fueron unas tiras con franjas blancas y negras separadas entre sí por la misma distancia. Se probó con varias medidas y finalmente se obtuvo que los sensores detectaban el cambio de color con una distancia mínima de 4 mm.

Debido a la poca precisión al imprimir los encoder, se decidió utilizar simplemente una marca negra de una determinada medida y así la señal de los sensores sería un pulso. Dicha marca negra debía ser mayor a 4 mm para que los sensores fueran capaces de detectarla.

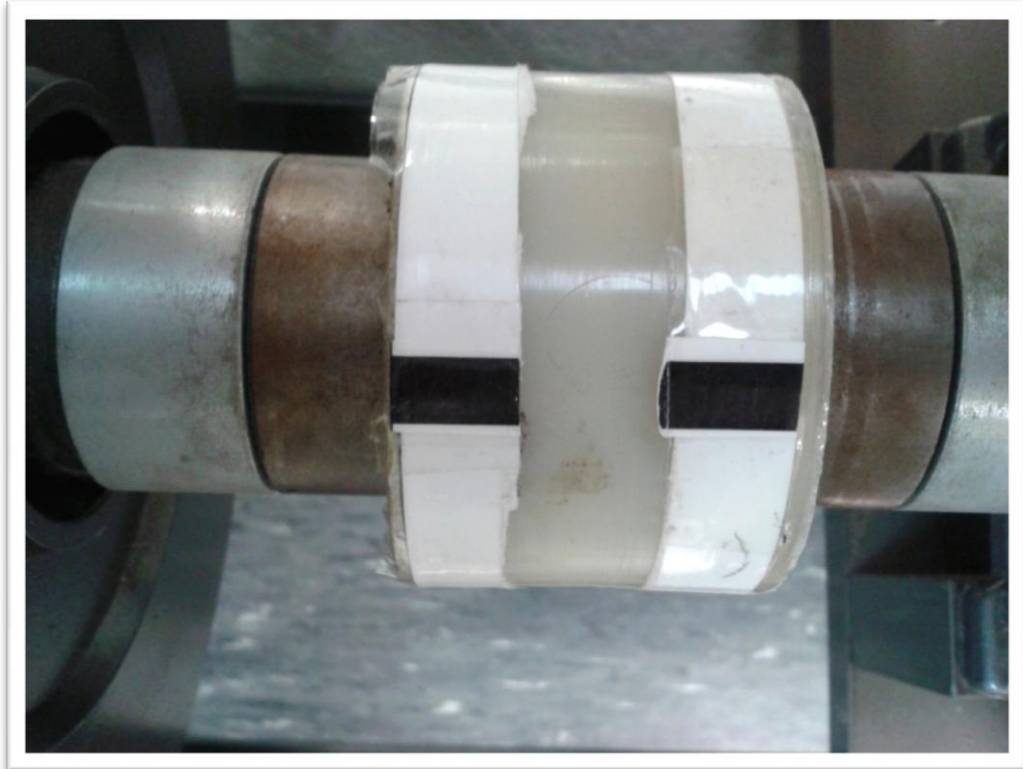


Fig. 17: Marcas en el acoplamiento.

El esquema correspondiente al montaje del circuito de los sensores es el siguiente:

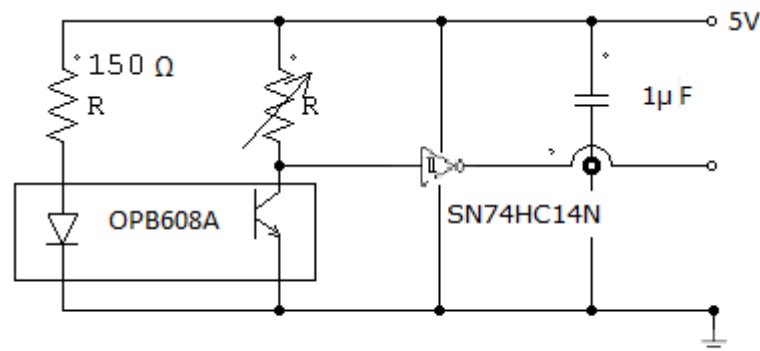


Fig. 18: Esquema del montaje para cada sensor.

La resistencia conectada al transistor es una resistencia variable, entre 0 y 200kΩ, para poder regularla dependiendo de las condiciones del lugar donde están situados y, así, conseguir la mejor forma de onda de los sensores.

Para eliminar el ruido en la señal del sensor, lo que se utiliza es una SN74HC14N, que lo que hace es usar la histéresis para prevenir el ruido

que podría tapar la señal original. Además de rectificar la señal, también la invierte.

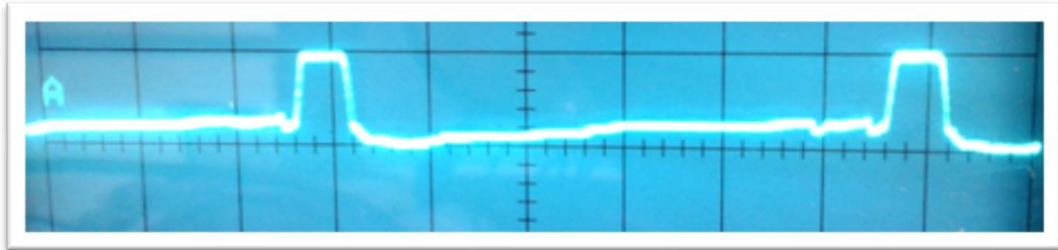


Fig. 19: Señal del sensor.

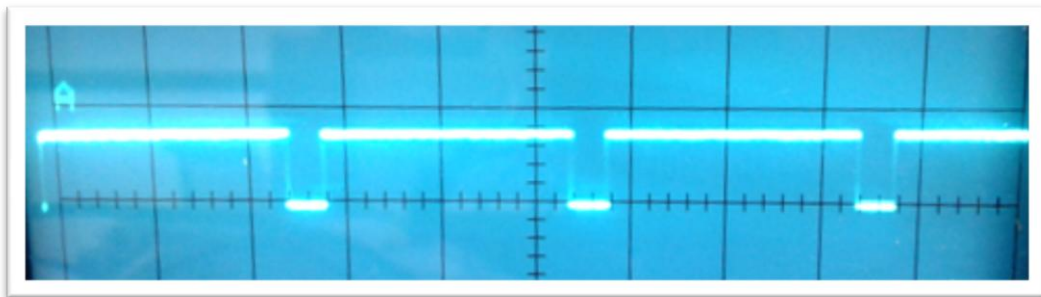


Fig. 20: Señal de salida del MM74C14.

Tras haber conseguido ver en el osciloscopio cómo la onda se modifica al aumentar el par y manteniendo constante la velocidad de giro de la máquina, se procede a diseñar un circuito capaz de darnos dicha deformación y, de esta manera, poder relacionar ésta con el Par sin la utilización del osciloscopio.

2.4. Puesta en marcha

En primer lugar, se coloca una puerta lógica Flip-Flops CD74HC73E. El funcionamiento de esta puerta consiste en detectar un flanco de subida y hasta no detectar el siguiente flanco de subida no conmuta. Con esto lo que conseguimos es una onda cuadrada.

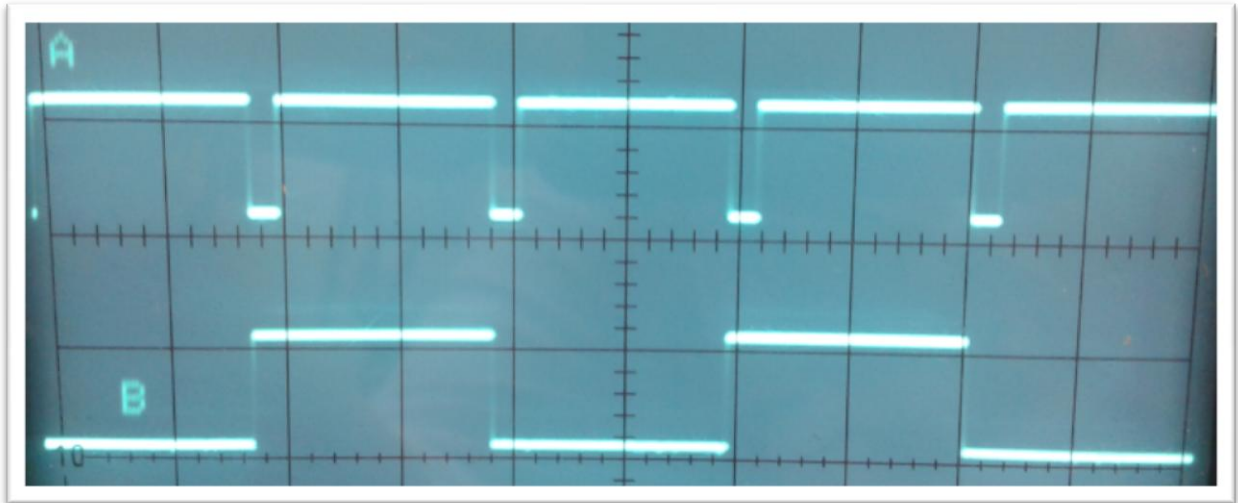


Fig. 21: Señal de salida de la puerta Flip-Flops.

Cada puerta Schmitt manda la señal de cada sensor a una puerta Flip-Flop, por lo que se siguen teniendo dos señales pero en vez de tener señales de un pulso, como anteriormente, ahora son señales cuadradas.

Estas señales se dirigen a una puerta OR-exclusiva (XOR), MM74C04N, que lo que hace es restar las señales siguiendo la tabla de verdad:

A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fig. 22: Tabla de verdad de una puerta XOR.

El esquema de este montaje es:

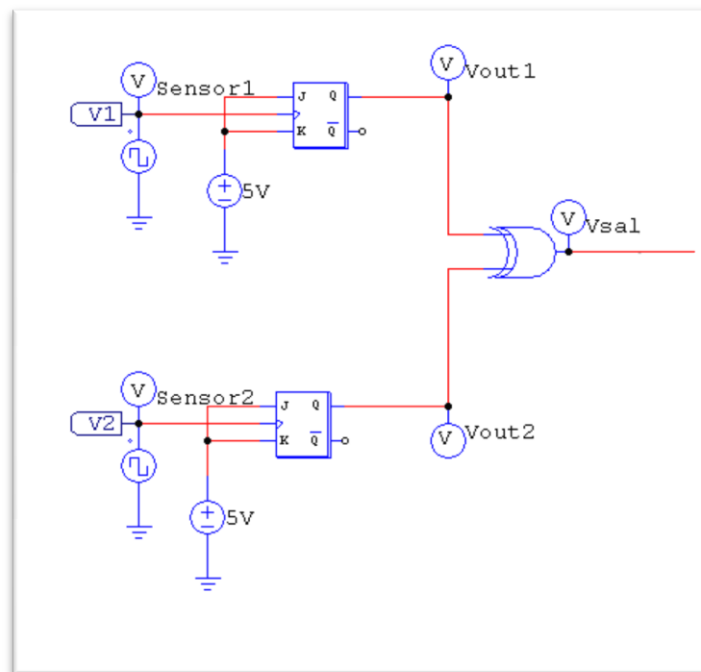


Fig.23: Esquema de montaje.

La señal de este esquema experimenta las siguientes transformaciones:

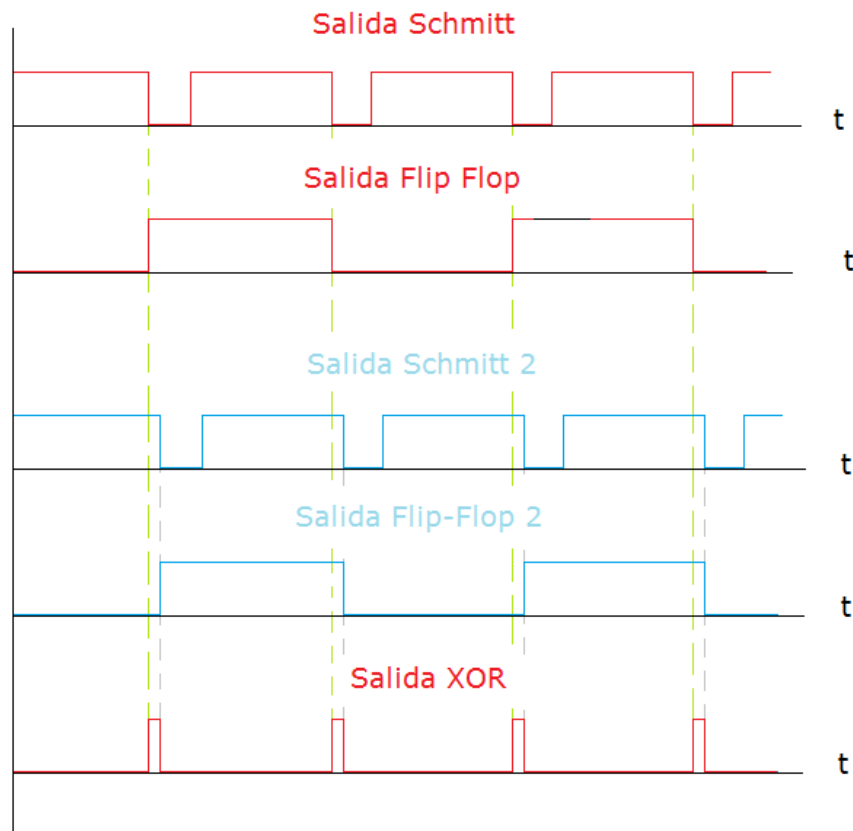


Fig. 24: Evolución de la señal.

2.4.1. Medidor del desfase por medio de ARDUINO.

La señal de salida de la XOR es una señal de pulso. El valor de dicho pulso muestra el desfase que hay entre las señales de los sensores.

Para medir este pulso sin ayuda del osciloscopio se va a utilizar un ARDUINO UNO. El ARDUINO UNO es una placa electrónica basada en el ATmega328. Cuenta con catorce entradas y salidas digitales, seis entradas analógicas, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reset.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños, en este caso el microcontrolador es ATmega328. Por otro lado, el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque (boot loader) que corre en la placa.



Fig. 25: ARDUINO UNO.

Se programa esta placa para que sea capaz de medir el pulso de la señal de salida de la OR-exclusiva con el siguiente código:

```
//programa para leer el ciclo de trabajo

int Entrada=7; //define el pin de Entrada

unsigned long DuracionPulso;

unsigned long DuracionResto;

unsigned long Periodo;

float CicloTrabajo;

float Media;

unsigned long Mediav;

float Mediac;

unsigned long Velocidad;

//

void setup()

{

    Serial.begin(9600); //inicializa comunicacion serie con PC
```

```
pinMode(Entrada, INPUT); //pone el pin 7 como entrada digital

}

void loop()

{

    Media = 0;

    Mediav = 0;

    Mediac = 0;

    for(int x = 1; x < 20; x++)

    {

        DuracionPulso=pulseIn(Entrada, HIGH); //mide la duracion del pulso

        DuracionResto=pulseIn(Entrada, LOW); //mide la duracion del resto

        Periodo = DuracionPulso + DuracionResto;

        CicloTrabajo = float(100) * DuracionPulso / Periodo;

        Velocidad = 60 / Periodo;

        Media = (Media + DuracionPulso)/float (x);

        Mediav = (Mediav + Velocidad) / x;

        Mediac = (Mediac + CicloTrabajo) / float (x);

    }

    Serial.println("Duracion del pulso: ");

    Serial.println(DuracionPulso);

    Serial.println("Ciclo de trabajo ");

    Serial.println(Mediac);

    Serial.println("Velocidad: ");

    Serial.println(Mediav);

    delay(250); //Espera un segundo

}
```

Al introducirle la señal de la puerta XOR, la variación del ciclo de trabajo al frenar la máquina no variaba, con lo que se determinó que la duración del pulso era tan pequeña que no era capaz de medirse mediante este método.

2.4.2. Medición del desfase por medio de la tensión media

El siguiente paso tomado es calcular la tensión media de la señal de salida de la XOR por medio de un convertidor analógico-digital. La programación de este convertidor se realiza por medio del ARDUINO UNO, ya explicado anteriormente. El código de programación utilizado para el convertidor es el siguiente:

```
//programa para el convertidor analógico-digital

int valor = 0;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);    // Inicializacion del modulo Serial.
}

void loop()
{
    valor = analogRead(1); //La entrada en el pin 1 y realiza la conversión.

    Serial.print("Valor :");

    Serial.println(valor);

    delay(1000);
}
```

Antes de mandar la señal al ARDUINO, ésta es filtrada y amplificada, es decir, que se calcula la tensión media de la señal de la XOR y se amplifica. El esquema es este:

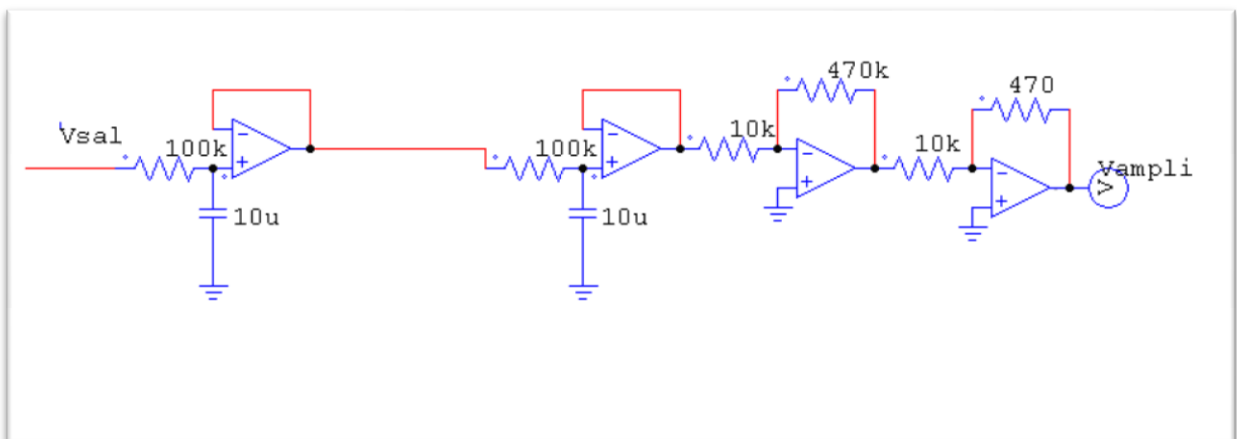


Fig. 26: Esquema el amplificador y el filtro.

Los condensadores utilizados en este montaje deben ser condensadores electrolíticos de Tántalo, que consiguen corrientes de pérdidas bajas.

El resultado de este montaje parecía funcionar, pero prácticamente no se veía la variación de la deformación al variar el Par de la máquina. Por ello, se decidió probar con otro circuito.

2.4.3. Medidor de la deformación por un alargador de pulso

La siguiente alternativa escogida fue un circuito alargador de pulsos.

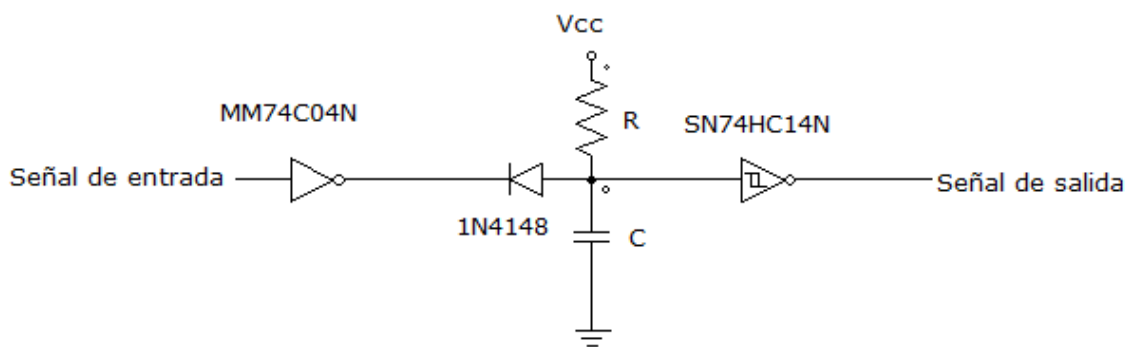


Fig. 27: Esquema del circuito.

Dada una señal de pulso, dicho circuito devuelve la misma señal pero ampliada. La amplificación del pulso depende de los valores de la resistencia y el condensador utilizados. Además, hay que cumplir la siguiente relación:

$$I_{sink} > \frac{V_{cc} \cdot C}{t} + \frac{V_{cc}}{R}$$

Siendo:

- I_{sink} → corriente absorbida del sensor. En nuestro caso 1.75mA.
- t → duración del pulso de la señal original.
- V_{cc} → Tensión de alimentación del circuito, 5V en este caso.
- C → valor del condensador utilizado.
- R → valor de la resistencia utilizada.

Tras realizar los cálculos adecuados, se colocan una resistencia de 220kΩ y un condensador de 0.82nF.

Para saber teóricamente cuánto aumenta el pulso hay que calcular la siguiente ecuación:

$$T = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_{cc} - V_{BE}}{V_{cc} - V_{T+}}\right)$$

Siendo:

- V_{BE} → tensión soportada por el diodo, 0.7V.
- V_{T+} → tensión del SN74HC14, en este caso 2V.
- V_{cc} → Tensión de alimentación del circuito, 5V en este caso.
- C → valor del condensador utilizado.
- R → valor de la resistencia utilizada.

Con este montaje, se conseguía que el pulso se amplificara siempre el mismo valor, es decir, cuando el valor del pulso era de 323μs, el valor del pulso de salida era siempre de 85μs más que el de entrada, es decir, 317μs. Consecuentemente, se sigue teniendo el mismo problema con la deformación ya que no se ha llegado a un método que nos permita amplificar dicha deformación.

2.5. Problemas y posibles soluciones

El principal problema de esta alternativa es que el pulso a medir es tan pequeño que con ninguna de las tres medidas adoptadas se ha sido capaz de obtenerlo.

La única solución posible pensada es la de encontrar un alargador de pulso que permita amplificar de una forma adecuada la variación del pulso en función de la deformación.

3. Medidor de par por medio de sensores piezoeléctrico

3.1. Objetivo

Este sistema consiste en relacionar el par de la máquina con la fuerza que ejerce una pletina de metal sobre un sensor piezoeléctrico.

Un sensor piezoeléctrico es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir la presión, aceleración, tensión o fuerza, transformando las lecturas en señales eléctricas. En este caso se va a utilizar para medir la presión que se ejerce sobre él.



Fig. 28: Sensor piezoeléctrico a utilizar.

La pizoelectricidad es un fenómeno presentado por determinados cristales que al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polaridad eléctrica en sus masas, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, es decir, al someterle a un campo magnético, éste se deforma bajo la acción de fuerzas internas. Por ello, el efecto piezoeléctrico es un efecto normalmente reversible, es decir, que cuando se deja de aplicar un campo eléctrico o voltaje exterior, el cristal recupera su forma original.

El montaje pensado para la puesta en marcha de este medidor de par constará de una pletina de metal unida por un extremo a la carcasa estatórica de la máquina y por el otro estará en contacto con el sensor piezoeléctrico. Este sensor podrá ser colocado tanto en el suelo como en el soporte de las máquinas. También, habrá que contar con los elementos de unión correspondientes para realizar dicho montaje, como pueden ser tornillos con sus respectivas tuercas y arandelas, o pegamentos.

3.2. Cálculos teóricos

Primeramente, se debe dimensionar la pletina metálica de tal manera que cumpla ciertas características importantes.

Una de estas características influye en su sección y tamaño. Ésta está basada en que la fuerza ejercida por la pletina debe estar en su totalidad aplicada en el sensor y con una distribución uniforme, para que la medición de éste sea correcta. Para que esto se cumpla, el extremo de la pletina unido al sensor debe estar en contacto totalmente con el área sensible del sensor.

Como se va a utilizar un sensor FlexiForce® A301 y con ayuda de sus hojas de características, se sabe que su área sensible tiene forma circular y su diámetro es de 9.53mm. Por consiguiente, la sección de la pletina a utilizar debe ser circular y su diámetro debe ser menor o igual al del área sensible del sensor.

En el caso de que el diámetro sea mayor que el del área sensible, se puede usar un "Puck". Éste es una pieza de material rígido (menor que el área de detección) que se coloca en el área de detección para asegurar que la trayectoria de carga pasa a través de toda esta área.

Además de cumplir todo lo anterior, hay que tener en cuenta que la pletina no se debe ni romper ni deformar. Para ello, la fuerza ejercida en ella no debe superar su límite elástico, explicado ya en el apartado 2 de este proyecto. Lo que determina esta característica es un espesor mínimo de la pletina.

Es decir, la elección de la dimensión de la pletina viene condicionada por su límite elástico y por la sección del área sensible del sensor piezoeléctrico.

En cuanto a la disposición de la pletina, ésta debe estar colocada de tal manera que sólo sufra efectos de compresión y de tracción, y también hay que asegurarse de que no se produzca pandeo. Para ello, dicha pletina tiene que estar colocada de tal forma que la fuerza que aplique al sensor debe ser perpendicular al soporte donde éste esté colocado, y, además, debe estar perpendicular al eje de la máquina.

Por otro lado, se encuentran los elementos que sirven para anclar la pletina metálica a la carcasa estatórica. Por comodidad, estos elementos serán tornillos que permitirán unir los dos componentes por el agujero ya existente en la carcasa, utilizado en el método habitual de medición del par. Cuando éstos sean elegidos, se deberá realizar un estudio para asegurarse de que no se rompen ni deforman por las fuerzas aplicadas sobre ellos.

En cuanto al sensor, se va a utilizar un FlexiForce® A301 que consta de un conector de dos pines y está diseñado para ser utilizado con un voltímetro o con su propia electrónica.

Para el montaje del sensor, hay que tener en cuenta varios aspectos, como son el tipo de adhesivo utilizado para fijarlo al soporte de la máquina, la calibración antes de realizar medidas, su fuerza de saturación, etcétera.

La fuerza de saturación del sensor es el punto en el que el dispositivo de salida ya no varía con la fuerza aplicada. Esta fuerza viene dada en las hojas de características junto con la sensibilidad del sensor.

La calibración es el método por el cual se relaciona la salida eléctrica del sensor a una real unidad de ingeniería, en este caso será Newton. Para calibrar, se debe aplicar una fuerza conocida por el sensor y equiparar la salida del sensor a esta fuerza. Repitiendo este proceso con varias fuerzas conocidas, se obtiene una gráfica que relaciona la fuerza con la resistencia del sensor.

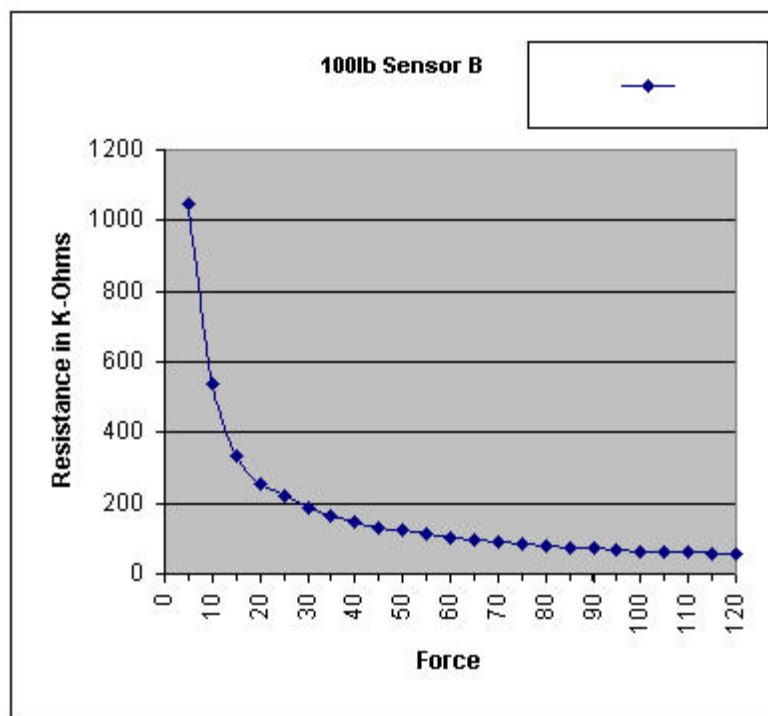


Fig.29: Curva de resistencia.

Además, hay que tener en cuenta una serie de características que empeoran el rendimiento del sensor. Estas son:

- Repetitividad: es la capacidad del sensor para responder de la misma manera a la aplicación repetida de una misma fuerza.
- Linealidad: es la relación que existe entre la señal de salida del sensor y la carga aplicada sobre él. Esta relación debe ser lineal.
- Histéresis: es la diferencia en la respuesta de salida del sensor durante la carga y descarga. Para que no se produzca histéresis, la diferencia debe ser nula.
- La deriva: es el cambio en la salida del sensor cuando una fuerza constante se aplica durante un período de tiempo. Si el sensor se mantiene bajo una carga constante, la resistencia del sensor continuamente disminuirá, y la salida aumentará gradualmente.

En cuanto al acondicionamiento de la señal medida, el fabricante aconseja el siguiente montaje:

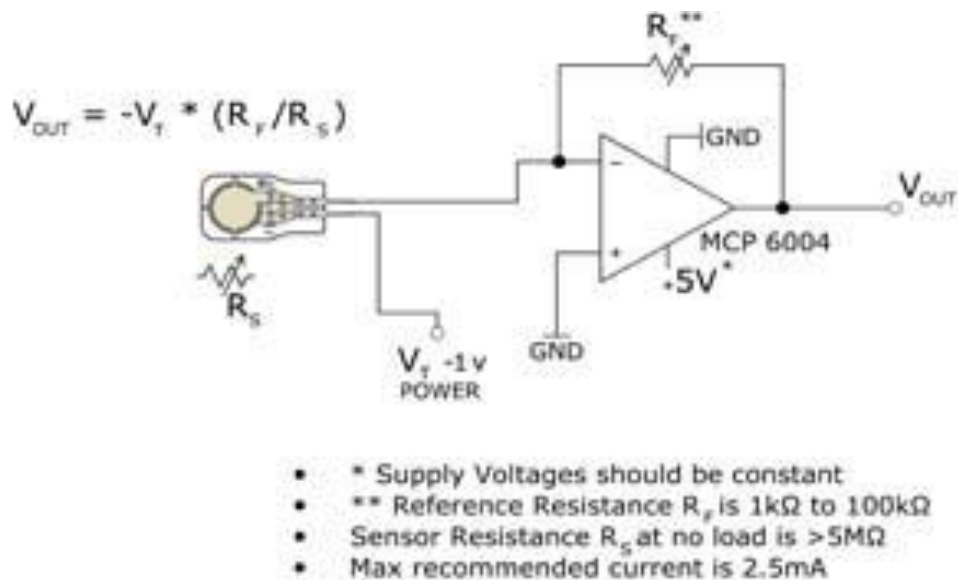


Fig. 30: Circuito de montaje.

Este circuito utiliza una disposición inversora del amplificador operacional para producir una salida analógica sobre la base de la resistencia del sensor y una resistencia de referencia fija (R_f). Se puede utilizar un convertidor analógico a digital para cambiar la tensión en una salida digital. En este circuito, la sensibilidad de los sensores puede ser ajustada cambiando la resistencia de referencia (R_f) y / o la tensión de accionamiento (V_T). Una resistencia de referencia más baja y / o tensión de accionamiento menor hará que el sensor sea menos sensible y aumente su fuerza activa.

La salida del circuito anterior se introducirá en ARDUINO, el cual estará programado para relacionar la tensión de la señal de salida con el par de la máquina. El programa será el siguiente:

```
int tension=0;

int par=0;

int k=0; // k se calcula en la calibración del sensor.

void setup()
{
    serial.begin(9600);
}

void loop()
{
    tension=analogRead(1); // El pin 1 como entrada analógica.
    par=tensión*k;
    serial.print("Valor del par: ");
    serial.println(par);
    delay(1000);
}
```

Gracias a este montaje, se espera conseguir una medición inmediata del par de la máquina eléctrica.

Conclusiones

En primer lugar, la alternativa que mide el par por medio de galgas extensométricas no se puede utilizar porque no se ha sido capaz de eliminar las interferencias que sufre la señal de salida, por lo que el valor del par no se puede obtener de manera exacta. Si se consiguiera eliminar dicho ruido, ésta sería una manera más cómoda que la utilizada actualmente en el laboratorio.

Como ya se ha explicado anteriormente, existen dos alternativas basadas en la utilización de galgas extensométricas que pueden arreglar el problema anterior de la señal. Por un lado, la utilización de galgas más precisas, pero este procedimiento conlleva un gasto superior dado que estas galgas son más caras y no interesa. La segunda opción, es la alimentación del puente Wheatstone en corriente alterna, con la que se puede elegir la frecuencia de la señal de salida y, con ello, la posibilidad de poder filtrar el ruido.

En segundo lugar, el método de medida por medio de sensores ópticos tampoco se puede llevar a cabo, porque el pulso de la señal de salida del sensor es tan pequeño que, actualmente, no se dispone de un montaje lo suficientemente preciso como para detectar y medir dicho pulso.

Por último lugar, la medición del par por medio de sensores piezoeléctricos es la alternativa que, aunque no se ha llevado a cabo en laboratorio, debería obtener la medida del par de una manera instantánea y sin ningún tipo de problema en la medición de la señal.

Por consiguiente, la manera más cómoda de medición del par es la utilización de sensores piezoeléctricos, dados los problemas en la medición de la señal de salida que acarrearán tanto la alternativa de las galgas extensométricas como la de los sensores ópticos.

Además, se podría realizar una fusión entre dos de estas tres alternativas. Si se utilizan los sensores fotoeléctricos para medir la velocidad y los sensores piezoeléctricos para medir el par, se obtiene la curva de par-velocidad.

Bibliografía

- [1] SENSOR DE PAR PARA DINAMO-FRENO – Ángel Gamba Garijo, Proyecto Final de Carrera, Universidad Pública de Navarra (2010).
- [2] CIRCUITOS MICROELECTRÓNICOS – S. Sedra y K. C. Smith, Oxford University Press, 4ª edición (2000).
- [3] SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL- Ramón Pallas Areny, Editorial Marcombo, 4ª Edición (2004).
- [4] MEDIDAS ELECTRICAS PARA INGENIEROS- Francisco Chacón de Antonio, Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, 2ª Edición (2007).
- [5] MATERIALES PARA INGENIERÍA 1, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño - Michael F. Ashby y David R. H. Jones, Department of Engineering, University of Cambridge, UK. Editorial Reverté.
- [6] Manual de ARDUINO: www.ardumania.es



ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE PAR

16 de noviembre de 2012

OBJETIVO

Comparación de diferentes diseños de medidores de par para concluir finalmente cuál es la manera más cómoda de obtener el par.

Síncrona

Corriente Continua

Asíncrona



-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño 2

-Diseño 3

-Conclusión

Máquina de corriente continua → dínamo-freno

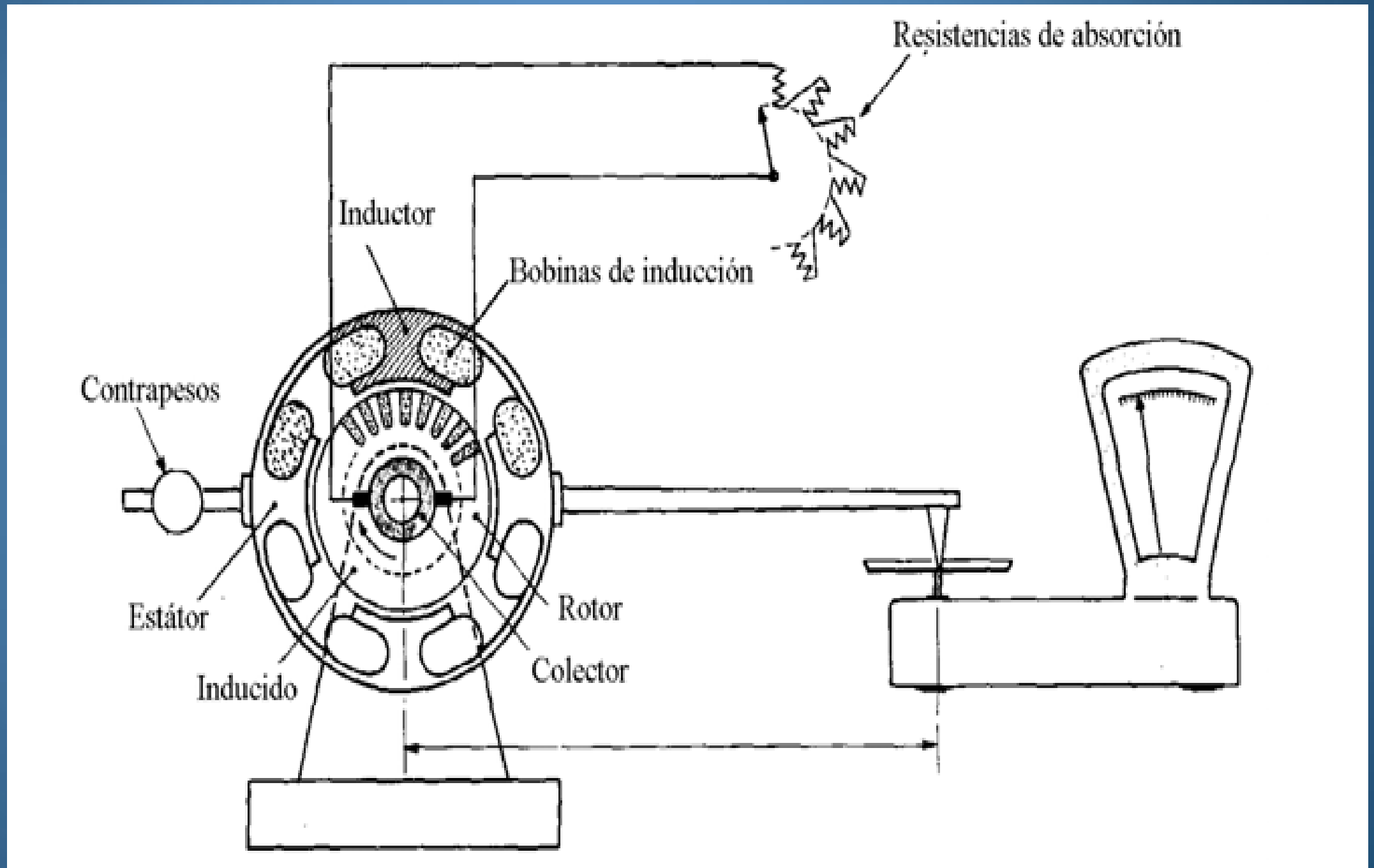
-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño 2

-Diseño 3

-Conclusión



Par electromagnético

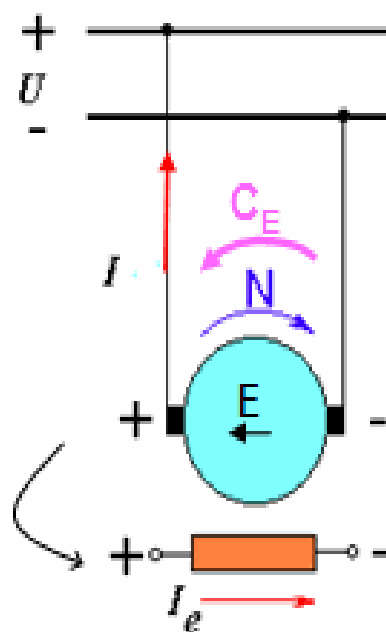
-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión



N - Fuerza resultante de la corriente I_e .

C_E - Par electromagnético que se opone a N .

Actualmente, el método de obtención de par en el laboratorio de Máquinas eléctricas es el siguiente:

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño 2

-Diseño 3

-Conclusión



1^{er} DISEÑO: MEDIDOR DE PAR POR MEDIO DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Realizado en un proyecto anterior bajo el título *"SENSOR DE PAR PARA DINAMO-FRENO"*

- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión



-Objetivo

-Diseño 1

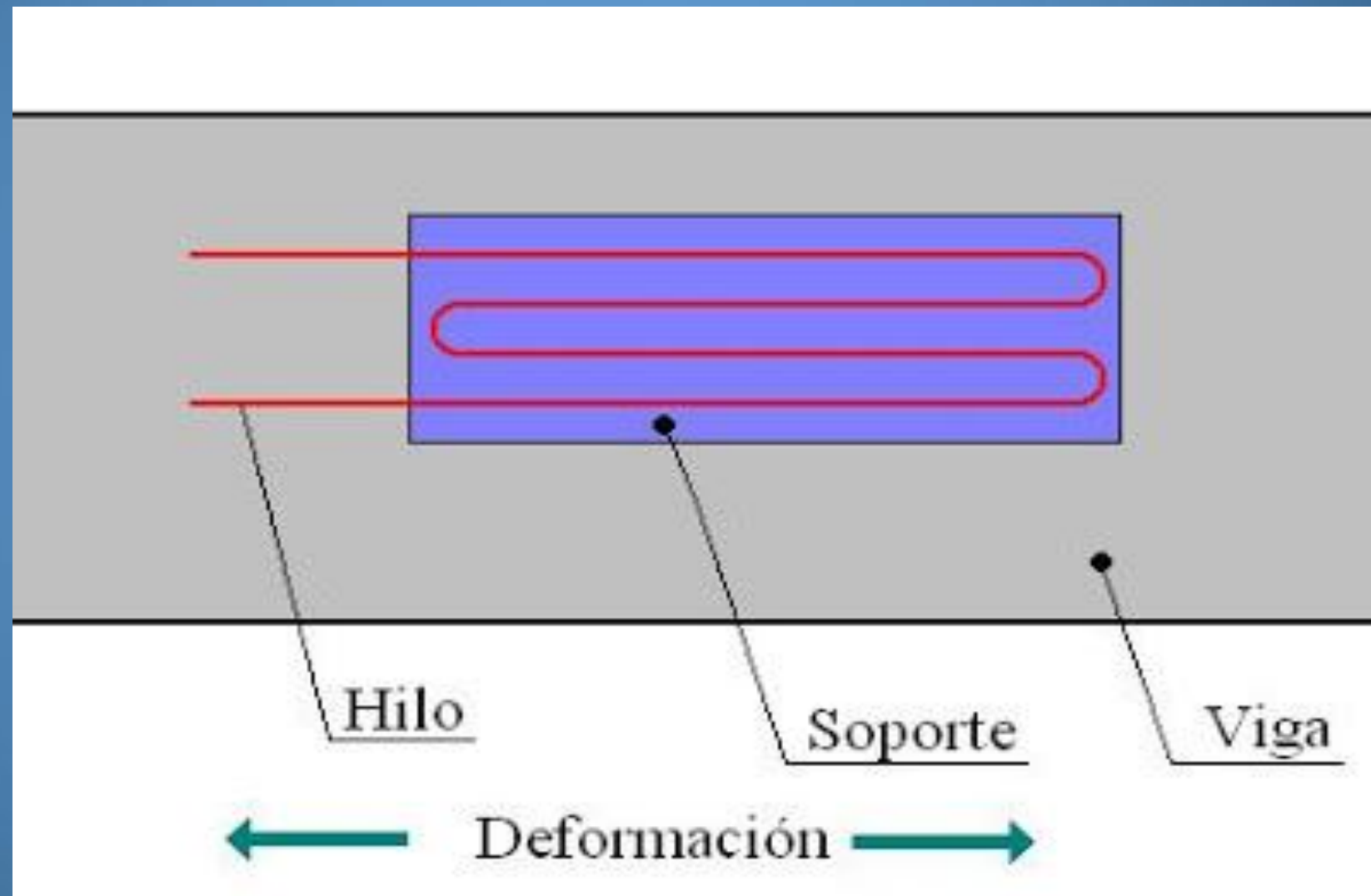
-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

CÁLCULOS TEÓRICOS

Galga extensométrica: sensor para medir la deformación, torque, presión, carga, posición, entre otras cosas, basado en el efecto piezorresistivo.



-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño 2

-Diseño 3

-Conclusión

Valor de la resistencia de una galga extensométrica;

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Variación de resistencia de la galga:

$$R = R_0 \cdot (1 + x)$$

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

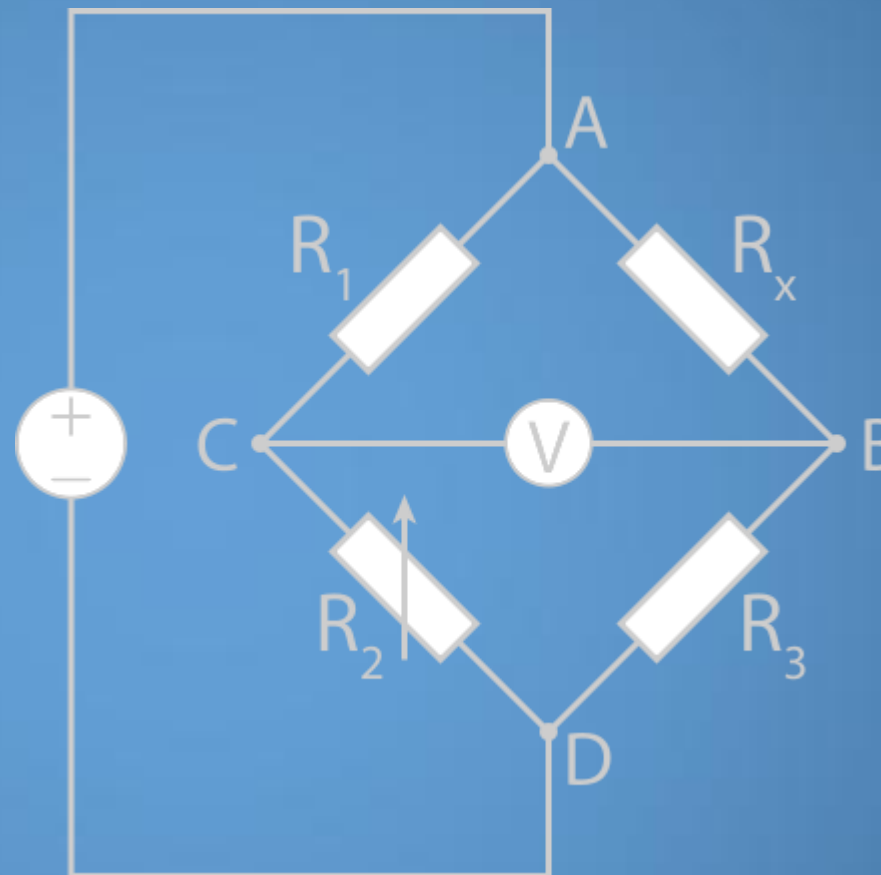
-Diseño 3

-Conclusión

Limitaciones de las galgas extensométricas:

- El esfuerzo aplicado no debe ser mayor al del margen elástico de deformación.
- La deformación de la galga igual a la del material.
- Deriva térmica.
- La potencia disipada aumenta la temperatura de la galga.
- El esfuerzo aplicado en la galga debe ser igual al aplicado en el material.
- Tensiones mecánicas.

Puente Wheatstone: señal eléctrica proporcional a la variación de resistencia.



-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño 2

-Diseño 3

-Conclusión

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

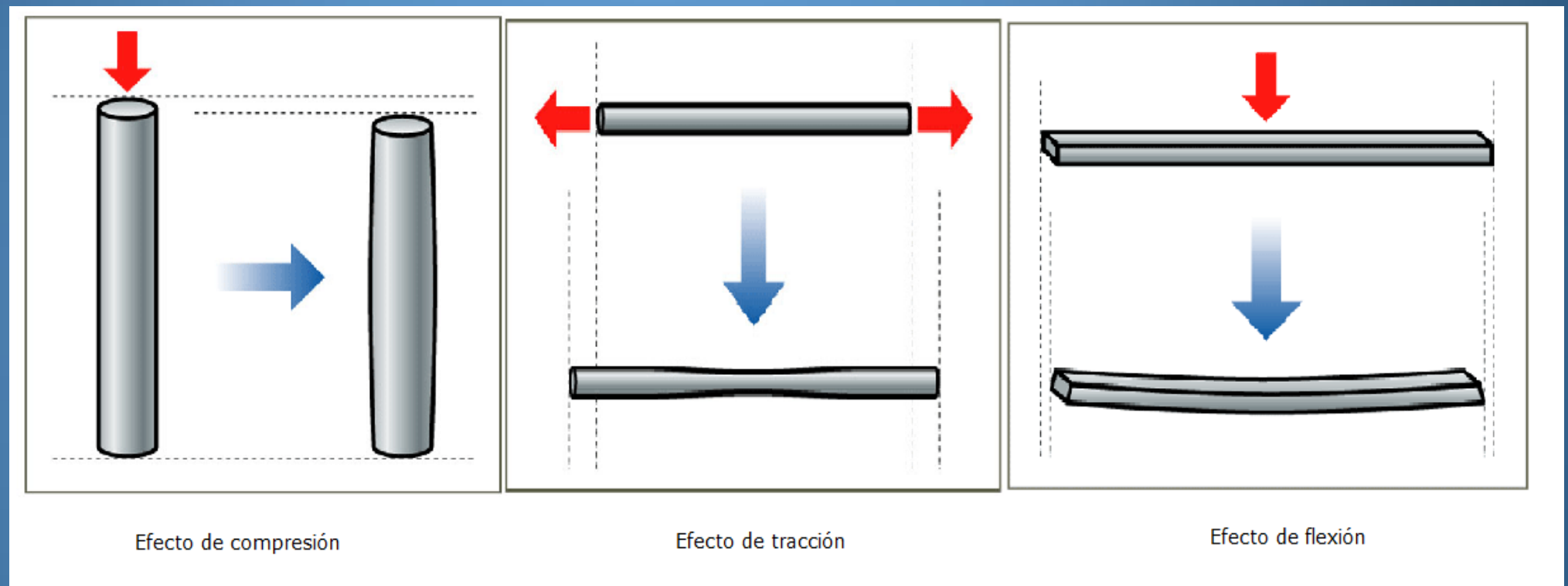
-Diseño 3

-Conclusión

CÁLCULOS PRÁCTICOS

Dimensionamiento y posición de la pletina metálica:

- La colocación de la pletina debe ser de tal manera que cumpla que ésta solo esté sometida a efecto de compresión o de tracción, no de flexión.



- Sección suficiente para que la pletina no se deforme ni se rompa.
- Efecto de pandeo.

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

Circuito eléctrico:

- Puente Wheatstone → Captación de la señal.
- Circuito amplificación y filtrado → Acondicionamiento de la señal.

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

PROBLEMAS Y POSIBLES SOLUCIONES

Principal inconveniente:

SEÑAL DE SALIDA INESTABLE

Otros inconvenientes:

- Una variación pequeña de resistencia supone una variación de la tensión de salida.
- Frecuencia de la señal de salida pequeña.

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

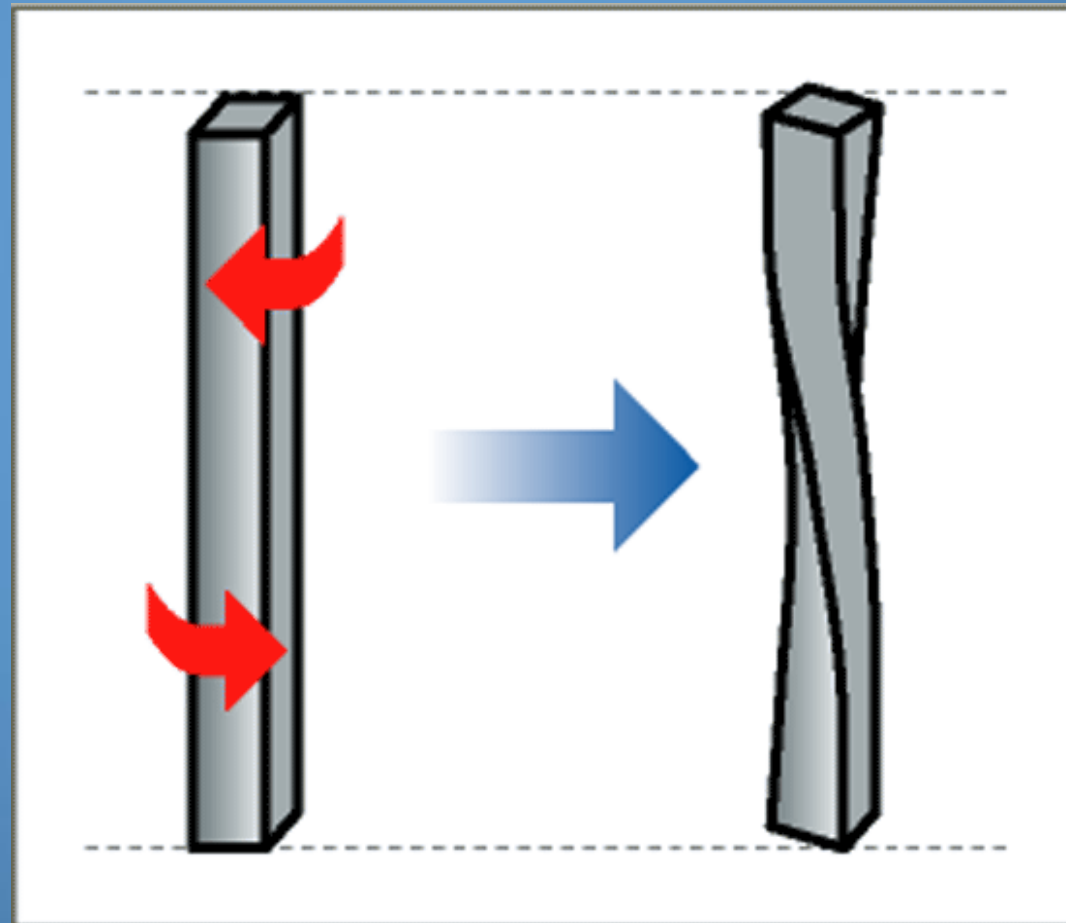
Posibles soluciones:

- Alimentar el puente Wheatstone en corriente alterna.
- Utilización de galgas más precisas.

2º DISEÑO: MEDIDOR DE PAR POR MEDIO DE SENSORES FOTOELÉCTRICOS

Objetivo: Relacionar el par con la deformación que sufren los acoplamientos del eje.

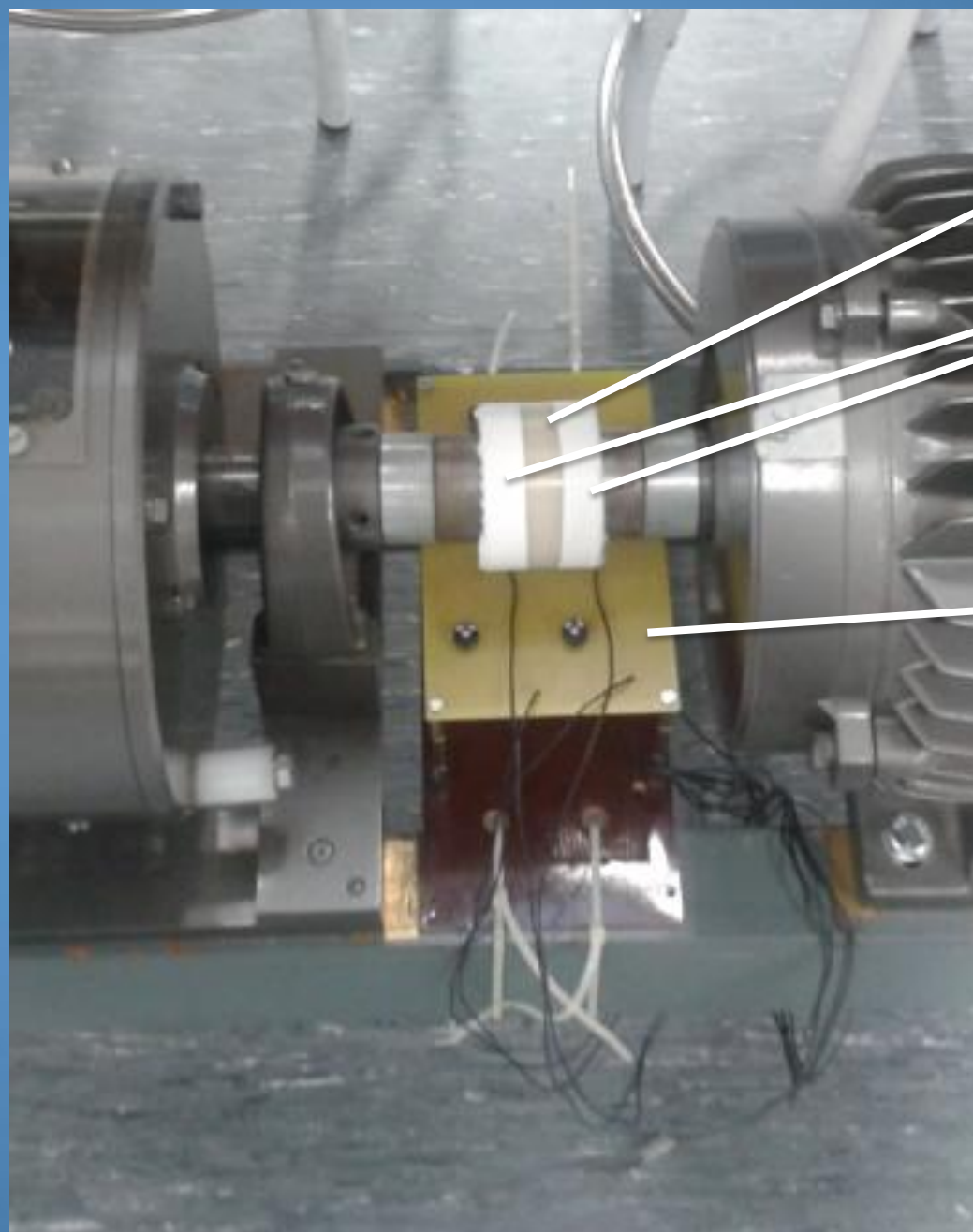
Efecto de torsión



- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión

- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión

Montaje realizado



Acoplamiento

Encoder

Soporte
sensores

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

CÁLCULOS TEÓRICOS

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

Material del que esta formado el acoplamiento:
Poliamida

Cálculo de la deformación del acoplamiento:

$$\theta = \frac{T \cdot L}{J \cdot G}$$

Las deformaciones que sufren los acoplamientos son del orden de los microradianes.

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

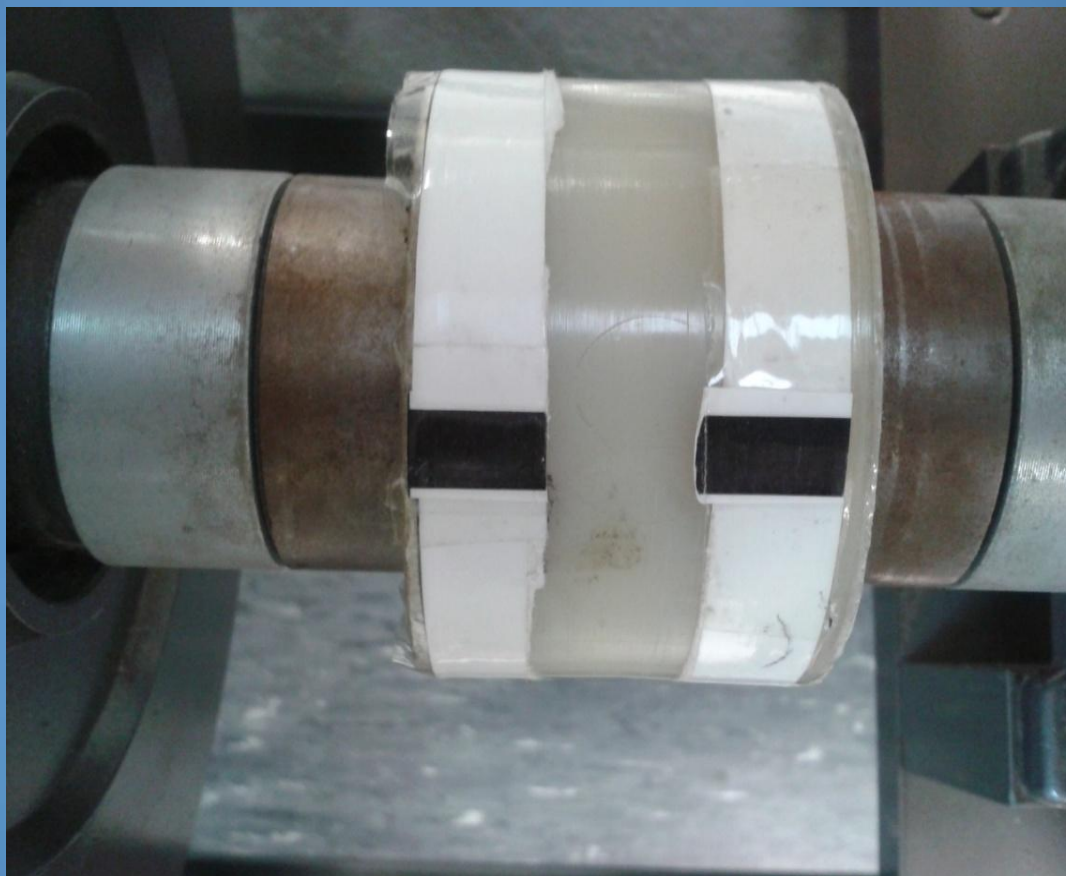
-Diseño 3

-Conclusión

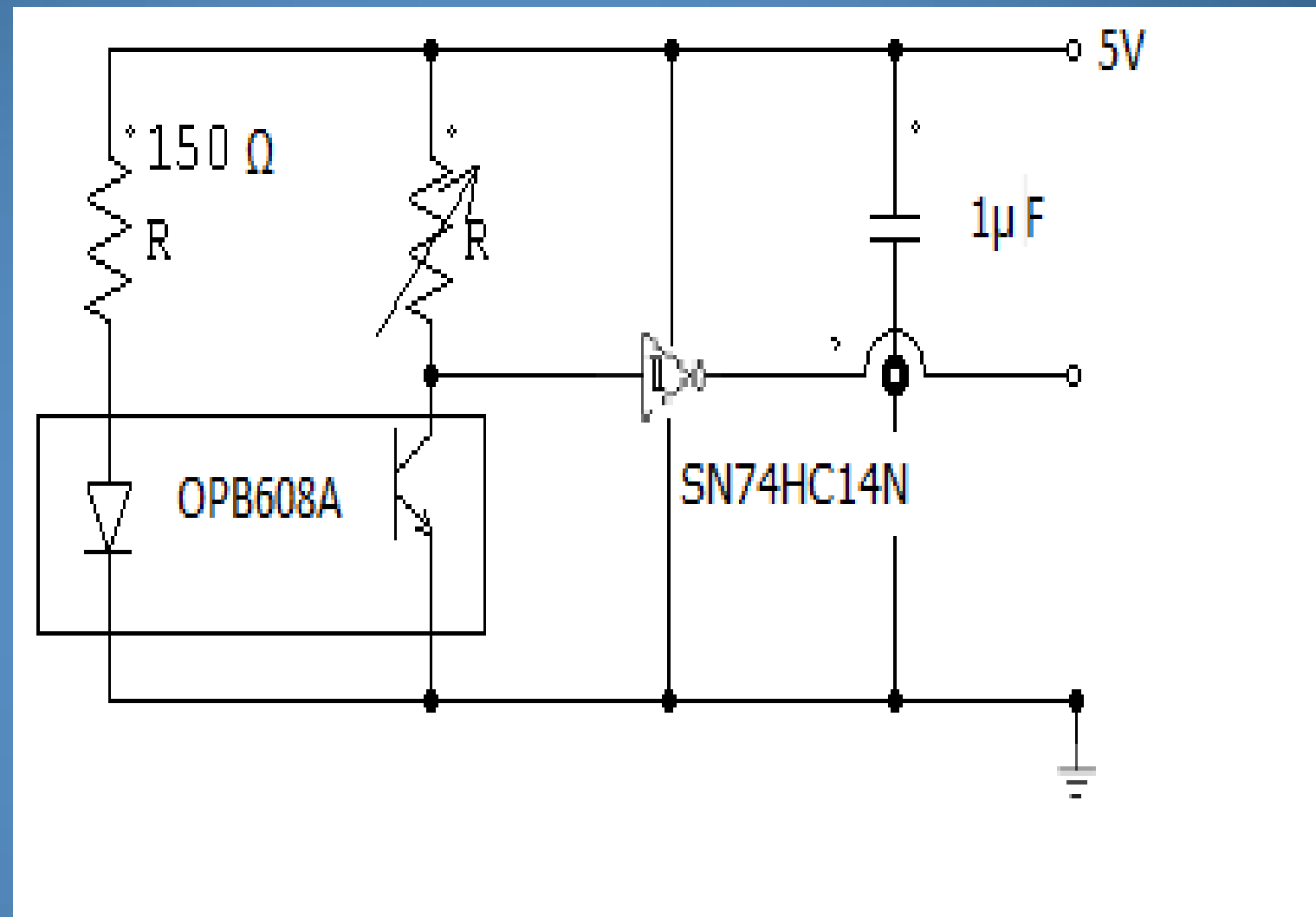
CÁLCULOS PRÁCTICOS

Elección del encoder adecuado

- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión

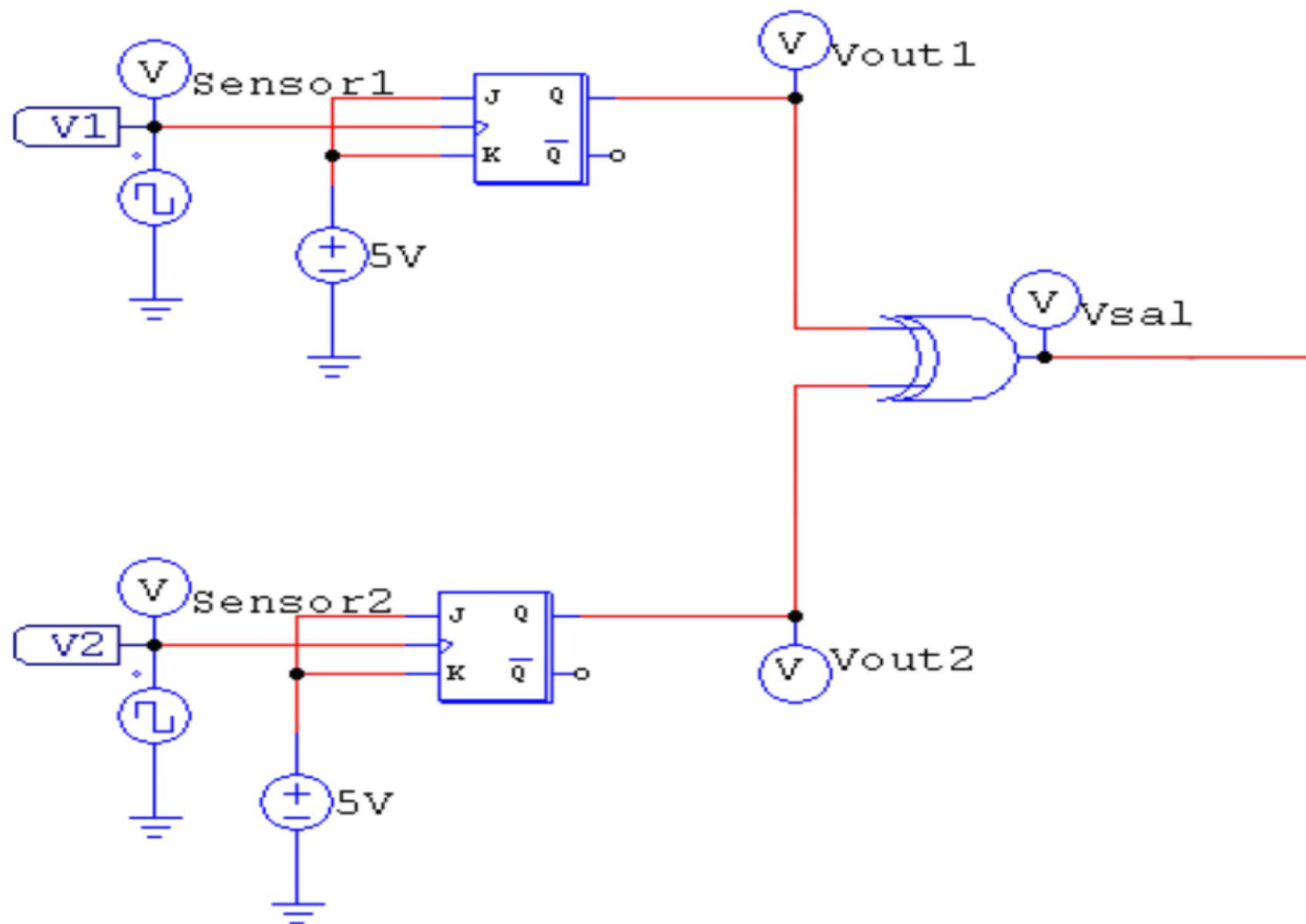


Esquema de conexión de los sensores



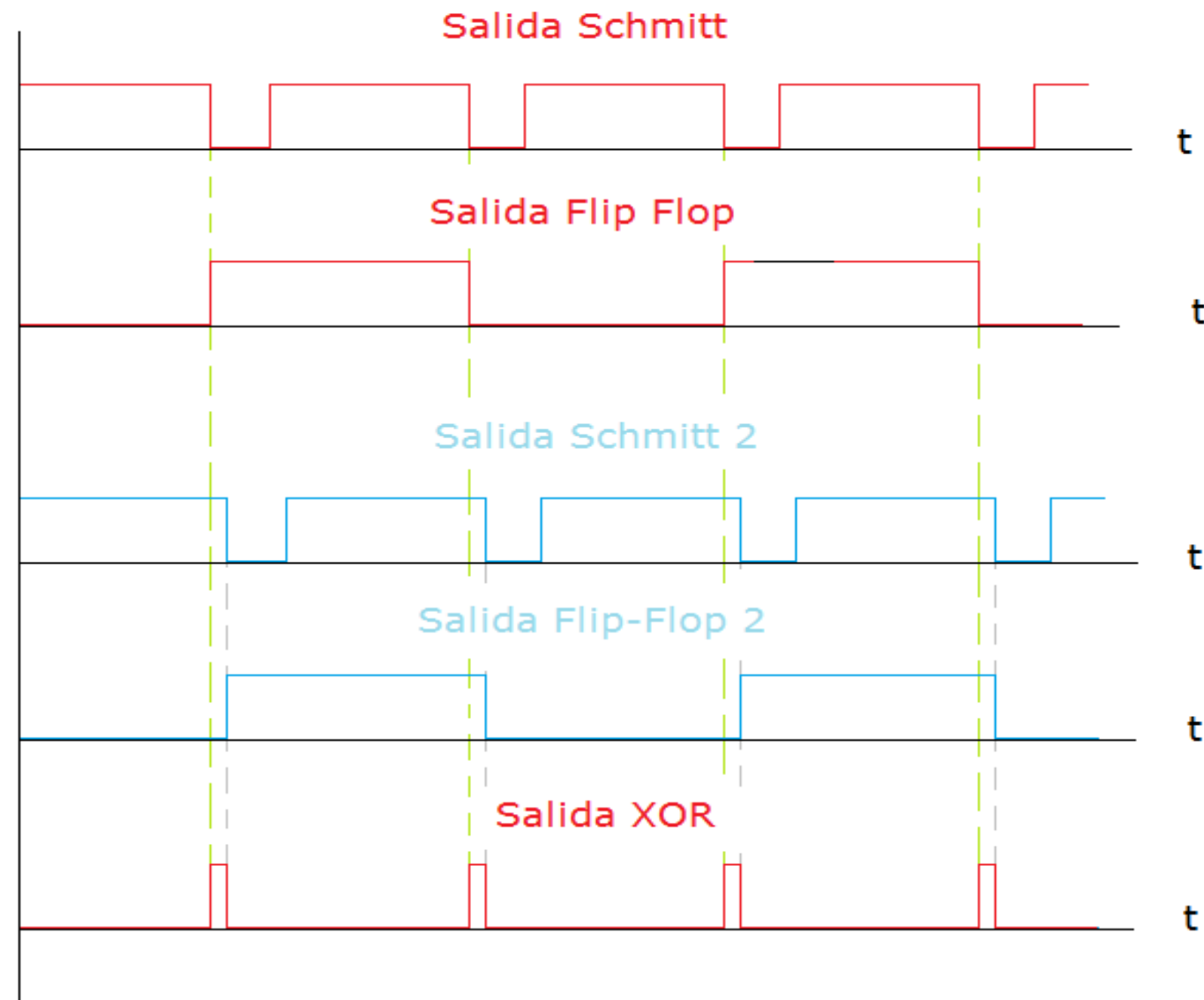
- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión

Acondicionamiento de la señal



- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión

Evolución de la señal de salida



- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión

Medición del desfase por medio del ciclo de trabajo

ARDUINO



Se programa ARDUINO para medir el ciclo de trabajo de la señal de salida y, así, obtener la duración del pulso.

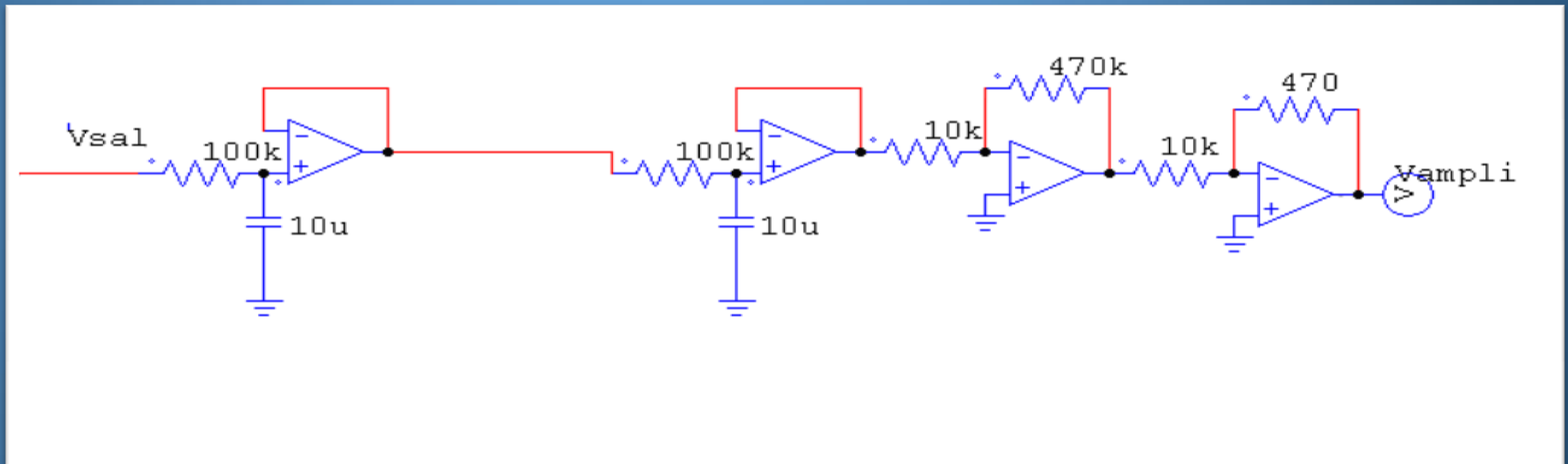
Inconveniente:

NO HAY VARIACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO

Medición del desfase por medio de la tensión media

Se programa ARDUINO para calcular la tensión media.

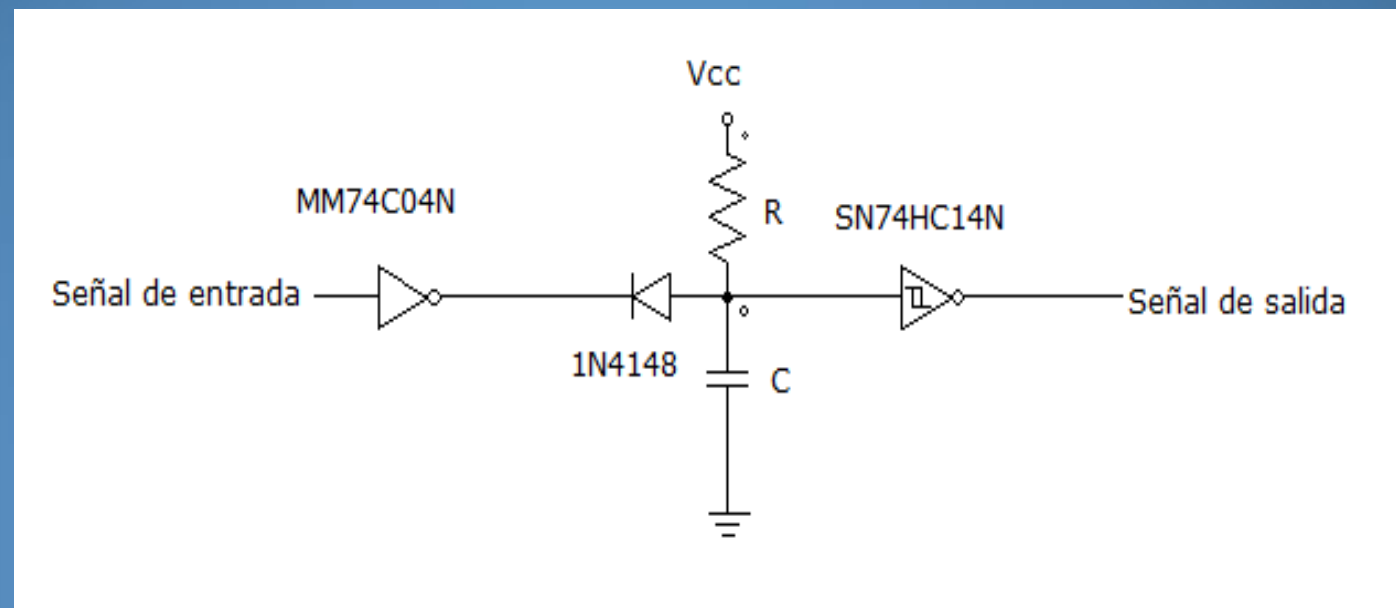
Se amplifica y filtra la señal de ARDUINO



Inconveniente:

PEQUEÑA VARIACION DE TENSION AL FRENAR LA MÁQUINA

Medición del desfase por medio de un alargador de pulso



$$I_{sink} > \frac{V_{cc} - V_{CE}}{t} + \frac{V_{cc}}{R}$$

$$T = R \cdot C \cdot \ln \left(\frac{V_{cc} - V_{BE}}{V_{cc} - V_{T+}} \right)$$

Inconveniente:

NO ES LO QUE BUSCAMOS

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

PROBLEMAS Y POSIBLES SOLUCIONES

Problema: **EL PULSO ES DEMASIADO PEQUEÑA**
para medirlo con las soluciones adoptadas.

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

Posible solución: encontrar un alargador de pulsos de manera que amplifique de una forma adecuada la variación del pulso en función de la deformación.

3^{er} DISEÑO: MEDIDOR DE PAR POR MEDIO DE SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

Objetivo: relacionar el par con la fuerza que ejerce una pletina metálica sobre un sensor piezoeléctrico.

Sensor piezoeléctrico



Efecto piezoeléctrico: al someter un determinado cristal a tensiones mecánicas adquieren una polaridad eléctrica en sus masas, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

CÁLCULOS TEÓRICOS

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

La pletina metálica debe cumplir:

- Su extremo en contacto con el sensor piezoeléctrico debe estar en contacto total con la zona sensible del sensor.
- No se debe ni romper ni deformar, esto se evita calculando el espesor mínimo de la pletina.
- Debe estar colocada de tal manera que sólo esté sometida a efecto de compresión y de tracción.

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

Para la utilización de este sensor hay que tener en cuenta:

- Fuerza de saturación.

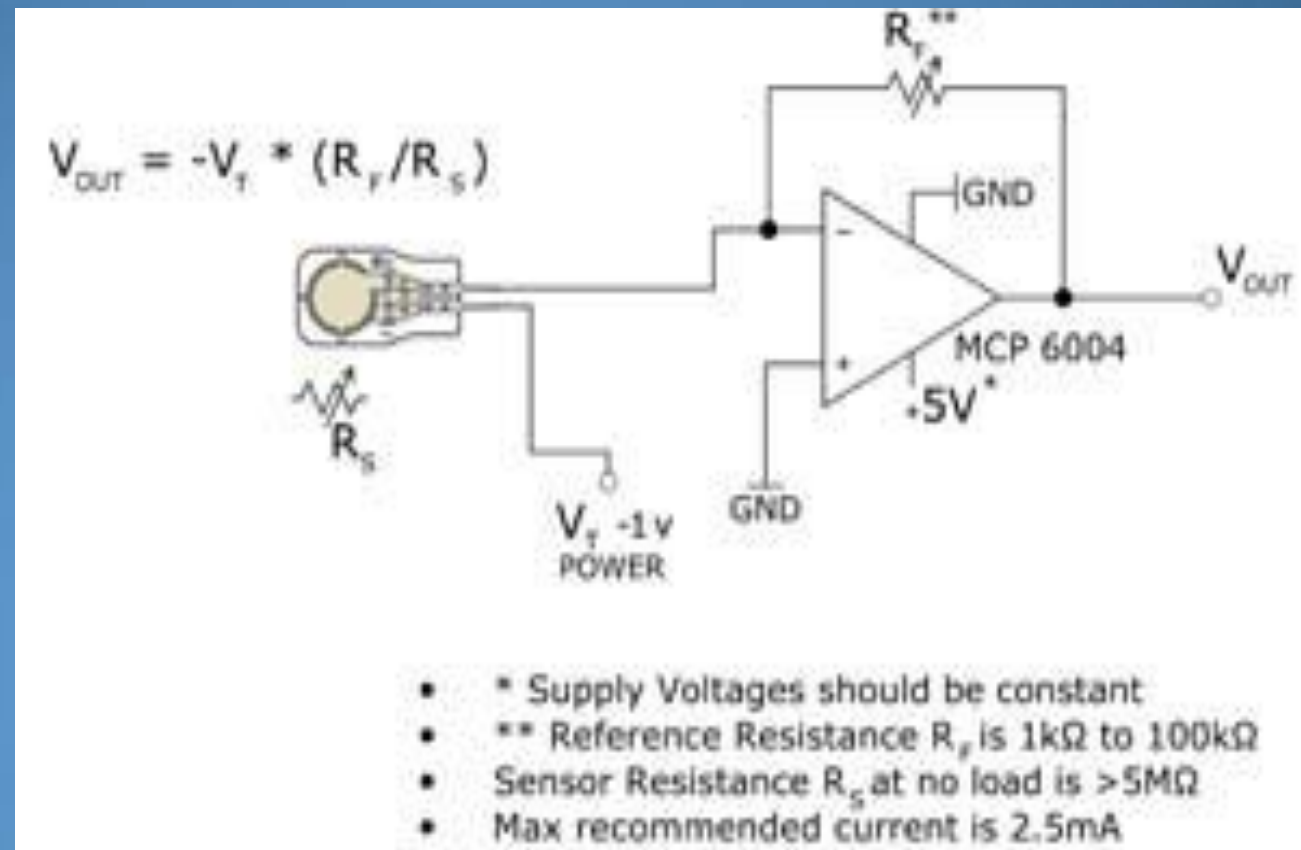
- Calibración.

- Material adhesivo utilizado para fijarlo al soporte de la máquina.

- Características que empeoran el rendimiento:

- Repetitividad.
- Linealidad.
- Histéresis.
- Deriva.

Acondicionamiento de la señal



La tensión de salida se introducirá a ARDUINO y así se obtendrá directamente el Par.

CONCLUSIÓN

~~EXTENSIONES
ALCANTARILLAS~~

~~SENSORES
FOTORECEPTORES~~

SENSORES
PIEZOELÉCTRICOS

- Objetivo
- Diseño 1
- Diseño2
- Diseño 3
- Conclusión

-Objetivo

-Diseño 1

-Diseño2

-Diseño 3

-Conclusión

Posibles soluciones:

1^{er} Diseño:

- Alimentar el puente Wheatstone en corriente alterna.
- Usar galgas más precisas.

2^o Diseño:

- Conseguir un alargador de pulso adecuado.

Unión del 2^o con el 3^{er} diseño:

- Curva Par-velocidad.

MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN